



**João Carlos Oliveira Impacto de plano de ventilação DCV no consumo
da Silva energético de edifícios**



João Carlos Oliveira da Silva **Impacto de plano de ventilação DCV no consumo energético de edifícios**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho aos meus pais, Elísio e Maria Olinda Silva, e à minha irmã Rute Silva.

O júri

Presidente

Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho

Professor auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Doutor Romeu da Silva Vicente

Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Orientador

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins

Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador Professor Doutor Nelson Martins, por todo o acompanhamento e motivação, a sua ajuda foi imprescindível para a realização de todo este trabalho.

Quero também agradecer ao Eng.º Ricardo Campos e Eng.º Sérgio Teixeira por toda a informação e ajuda prestada referente ao trabalho executado no Palácio do Gelo Shopping.

Agradeço aos meus pais, pela dedicação, apoio incondicional, e por todos os sacrifícios que tiveram e possibilitaram este meu percurso.

Um agradecimento especial à minha tia Lau e ao meu tio Zé Luís pelo apoio dado nestes últimos dois anos. Não poderia deixar de agradecer também a todos os meus amigos e restante família, sem dúvida foram imprescindíveis.

palavras-chave

ventilação, DCV, caudal mínimo de ar novo, eficiência energética, CO₂

resumo

O objetivo principal da presente dissertação centra-se na avaliação do impacto de estratégias de controlo da ventilação do tipo DCV (*Demand Controlled Ventilation*) no consumo energético de edifícios.

A Diretiva EPBD reformulada (2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010), atualmente transposta para a legislação portuguesa através do Decreto-lei n.º118/2013 de 20 de agosto, vem estabelecer requisitos de ventilação e qualidade do ar interior através da introdução de valores de caudais mínimos de ar novo de forma a salvaguardar os níveis de proteção de saúde e bem-estar dos ocupantes dos edifícios.

A implementação de uma estratégia de DCV, a qual consiste em adequar o valor de caudal de ar novo insuflado em função da qualidade do ar interior, permite promover a eficiência energética, garantindo que não se ultrapassam valores de concentração limite de CO₂ no interior dos edifícios.

No desenvolvimento do trabalho foram utilizadas ferramentas de simulação dinâmica (*DesignBuilder* e *EnergyPlus*), no sentido de avaliar o impacto de diferentes estratégias DCV em 3 regiões climáticas de Portugal, Porto, Bragança e Évora, com dois perfis de ocupação distintos, um típico de um edifício de escritórios e outro típico de um edifício comercial.

Foi ainda desenvolvida a simulação dinâmica de um edifício real, o Palácio do Gelo *Shopping*, onde se analisou o impacto da estratégia DCV nos consumos energéticos do edifício, assim como um controlador DCV do tipo *On/Off*, desenvolvido na plataforma *Arduino*, o qual se implementou nos sistemas de climatização do edifício.

Concluiu-se que a implementação de uma estratégia DCV se torna interessante em termos de redução de consumos energéticos, sobretudo em climas frios e em edifícios onde a ocupação é imprevisível e com grandes variações. Através do aparato experimental verificou-se que a aplicação prática de um controlador DCV obtém resultados interessantes e promissores no sentido de redução de consumos.

keywords

ventilation, DCV, minimum outside air flow, energetic efficiency, CO₂

abstract

The main goal of this dissertation consists in the evaluation of the impact of DCV (Demand Controlled Ventilation) strategies in the energy consumption of buildings.

The EPBD recast directive (2010/31/EU from the European Parliament and Council, in 19th of May of 2010), transposed to the Portuguese legislation through the Decreto-lei n.º118/2013 de 20 de agosto, establishes requirements of ventilation and indoor air quality through the introduction of the minimum values of outdoor air flow in order to provide levels of protection of health and well-being to building's occupants.

The implementation of a DCV strategy, which consists in adjusting the outside air flow in terms of measured indoor air quality, allows energy savings and the preservation of indoor CO₂ concentration within prescribed limits.

Dynamic simulation tools (*DesignBuilder* and *EnergyPlus*) were used in order to evaluate the impacts of different DCV strategies in three different Portuguese climate regions – Porto, Bragança and Évora – with two distinct occupation profiles – one of them typical for an office building and the other typical for a commercial building. The dynamic simulation of a real building, the *Palácio do Gelo* Shopping, was performed in order to evaluate the impact of a DCV strategy on the energy consumption of a real building operated under real conditions. In addition a DCV controller (On/Off type) was developed on *Arduino* platform and tested integrated in the control system of part of the existing HVAC systems in the building.

It was concluded that the implementation of a DCV strategy is very interesting energy saving measure in cold climates namely on buildings where the occupancy is unpredictable and subjected to great variations. Through the experimental demonstration it was possible to verify that the application of a DCV controller may be easy, inexpensive although very effective as energy saving measure.

Índice

Índice	I
Índice de Figuras	V
Índice de Tabelas.....	IX
Lista de Acrónimos	XI
Nomenclatura.....	XIII
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivo do Trabalho.....	3
1.3. Revisão Bibliográfica	4
1.3.1. Qualidade do Ar Interior	4
1.3.2. Origem dos Contaminantes.....	5
1.3.3. Controlo da Qualidade do Ar Interior	6
1.3.4. CO ₂ na atmosfera	7
1.3.5. Geração de CO ₂	8
1.3.6. Dióxido de Carbono como indicador de Qualidade do Ar.....	10
1.3.7. Relação entre a Ventilação e o dióxido de Carbono	11
1.3.8. Consumo energético associado à ventilação	13
1.3.9. Estratégia DCV.....	16
1.3.10. DCV através da utilização de sensores de CO ₂	17
1.3.11. Simulação computacional da estratégia DCV.....	18
1.4. Contributo da tese	20
1.5. Organização do documento	21

2.	Estratégias de Controlo da Ventilação	23
2.1.	Controlo com economizador (<i>free-cooling</i>)	24
2.1.1.	Caso de estudo	25
2.2.	Controlo DCV CO ₂	26
2.2.1.	Set-Point Control	27
2.2.2.	Proportional Control.....	27
2.2.3.	Proportional-Integral-Derivative	28
2.2.4.	Casos de Estudo.....	28
2.3.	Combinação de Estratégias de Controlo da Ventilação	32
3.	Simulação computacional de estratégias DCV	39
3.1.	<i>EnergyPlus</i>	39
3.2.	Estratégias DCV no <i>EnergyPlus</i>	40
3.2.1.	<i>VRP – Ventilation Rate Procedure</i>	40
3.2.2.	<i>IAQP - Indoor Air Quality Procedure</i>	43
3.2.3.	<i>PC - Proportional Control</i>	45
3.2.4.	Outputs Possíveis	47
3.3.	Análise Crítica ao Controlo DCV no <i>EnergyPlus</i>	48
4.	Potencial do DCV na promoção da eficiência energética.....	51
4.1.	Método de Cálculo definido na Portaria Técnica Provisória	51
4.1.1.	Método Analítico	52
4.1.2.	Método prescritivo.....	55
4.2.	Comparação <i>EnergyPlus</i> com a Portaria Técnica no que respeita à evolução temporal da concentração de CO ₂	56
4.3.	Estudo Paramétrico das diferentes estratégias DCV.....	58

4.3.1.	Cenários Simulados	59
4.3.2.	Análise do cenário base.....	61
4.3.3.	Resultados Obtidos	61
5.	Caso de Estudo - Palácio do Gelo Shopping	65
5.1.	Simulação Dinâmica do Palácio do Gelo Shopping.	65
5.1.1.	Envolvente do edifício	65
5.1.2.	Sistemas de Climatização	66
5.1.3.	Ocupação.....	68
5.1.4.	Sistemas de Iluminação.....	69
5.1.5.	Controlo DCV implementado	70
5.1.6.	Resultados	70
5.2.	Controlador DCV	72
5.2.1.	Desenvolvimento do Controlador DCV	72
5.2.2.	Calibração sensor de CO ₂	73
5.3.	Experiência desenvolvida	74
6.	Conclusões e perspetivas futuras.....	77
6.1.	Limitações e Trabalho Futuro.....	78
Apêndice A	85
A.1.	Horários de Ocupação do Palácio do Gelo Shopping.....	85
A.2.	Soluções Construtivas – Palácio do Gelo Shopping.....	89
A.3.	CÓDIGO IMPLEMENTADO NO ARDUINO	90

Índice de Figuras

Figura 1 – Poluentes típicos dependendo da sua origem exterior/interior [9].....	5
Figura 2 – Características da ventilação em função dos contaminantes [10].....	7
Figura 3 – Geração de CO ₂ e O ₂ em função da atividade física (para um adulto médio) [8]	9
Figura 4 – Caudal de ar exterior em função dos limites de concentração de CO ₂ [15]	10
Figura 5 – Volume de controlo para uma única zona [8]	11
Figura 6 – Concentração do CO ₂ de acordo com o caudal de ar novo por pessoa [20]	13
Figura 7 – Exemplos do impacto energético [9]	15
Figura 8 – Representação esquemática de um Sistema AVAC típico [31]	24
Figura 9 – Sequência de estratégia free-cooling [32]	25
Figura 10 – Consumo energético dos sistemas AVAC, e percentagem de poupança energética com <i>free-cooling</i> [33]	26
Figura 11 – Influência do período de operação na redução do consumo da estratégia DCV em relação a uma estratégia CAV [37]	31
Figura 12 - Representação esquemática do controlo feito na sala teste [38]	31
Figura 13 – Ocupação típica semanal para os 4 tipos de edifícios simulados [39]	33
Figura 14 – Consumo energético dos sistemas AVAC, adicionando um controlo VAV e DCV a um sistemas CAV com economizador [31]	36
Figura 15 – Percentagem de redução de consumos em função da estratégia de controlo para um edifício comercial [40]	37
Figura 16 - Percentagem de redução de consumos em função da estratégia de controlo para um edifício tipo escritório [40]	37

Figura 17 – Representação do funcionamento de um Sistema CAV	49
Figura 18 – Representação do controlo VRP	49
Figura 19 – Representação do controlo IAQP	49
Figura 20 – Representação do controlo PC	50
Figura 21 – Variação temporal dos níveis de concentração do CO ₂	57
Figura 22 – Representação gráfica da célula de teste	58
Figura 23 – Horário de Ocupação típica de escritório, a)semana e b)fim-de semana.....	59
Figura 24 – Horário de Ocupação típica edifício comercial, a)semana e b)fim-de semana	59
Figura 25 – Mapa de Portugal com indicação das cidades cujos climas são analisados [45]	60
Figura 26 - Média de temperaturas mensais dos três climas analisados [45].....	60
Figura 27 - Distribuição de consumos dos sistemas AVAC nos diferentes cenários para uma ocupação típica de um edifício de escritório	62
Figura 28 – Distribuição de consumos dos sistemas AVAC nos diferentes cenários para uma ocupação típica de um edifício comercial	63
Figura 29 – Diferença percentual das diferentes estratégias de controlo em relação ao cenário base.....	63
Figura 30 - Representação gráfica do Palácio do Gelo Shopping desenvolvido no <i>software DesignBuilder</i>	66
Figura 31 – Representação esquemática de uma UTA [46].....	66
Figura 32 - Representação esquemática de uma UTAN [46]	67
Figura 33 – Semana típica da ocupação do mês de Outubro do Palácio do Gelo Shopping	69
Figura 34 – Distribuição de consumos da zona de circulação.....	71

Figura 35 – Comparação de consumos térmicos mensais do edifício original com a implementação da estratégia DCV.....	71
Figura 36 – Representação esquemática do controlador desenvolvido.....	73
Figura 37 – Sensibilidade do sensor de CO ₂	74
Figura 38 - Evolução dos níveis de CO2 do estudo feito na sexta-feira.....	75
Figura 39 - Evolução dos níveis de CO2 do estudo feito no Sábado	75
Figura 40 - Evolução dos níveis de CO2 do estudo feito no Domingo.....	75
Figura A. 1 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Fevereiro.....	85
Figura A. 2 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Janeiro	85
Figura A. 3 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Março	85
Figura A. 4 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Abril.....	86
Figura A. 5 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Maio	86
Figura A. 6 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Junho	86
Figura A. 7 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Julho	87
Figura A. 8 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Agosto.....	87
Figura A. 9 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Setembro	87
Figura A. 10 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Outubro	88
Figura A. 11 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Novembro.....	88
Figura A. 12 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Dezembro.....	88

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Principais tipos de Poluentes do ar Interior [8]	4
Tabela 2 – Efeito do CO ₂ do ser humano (adaptado de [13])	11
Tabela 3 – Dados climáticos para as diferentes locais, adaptado de [33]	26
Tabela 4 – Estratégia DCV recomendada de acordo com o tipo de ocupação [32].....	28
Tabela 5 – Consumos dos sistemas AVAC para diferentes estratégias de controlo DCV [35] ..	29
Tabela 6 – Dados climáticos das localizações simuladas [31].....	33
Tabela 7 – Eficácia de distribuição do ar [44].....	42
Tabela 8 – Área de DuBois em função da idade dos ocupantes e parcela a adicionar à atividade metabólica em função da faixa etária	53
Tabela 9 – Limiares de proteção do CO ₂ [mg/m ³] ou [ppm].....	54
Tabela 10 – Caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devido à ocupação [m ³ /h-pessoa].....	55
Tabela 11 – Caudal de ar novo determinado em função da carga poluente devida ao edifício [m ³ /(hora.m ²)].....	56
Tabela 12 – Especificações utilizadas no modelo desenvolvido	57
Tabela 13 – Variáveis da célula de teste utilizada.....	58
Tabela 14 – Características Técnicas dos Equipamentos AVAC do Palácio do Gelo Shopping.	67
Tabela 15 – Densidades de Iluminação	70
Tabela 16 – Lista de Componentes utilizados no desenvolvimento do controlador	73
Tabela A. 1 - Soluções Construtivas utilizadas no modelo de simulação Dinâmica do Palácio do Gelo Shopping.....	89

Lista de Acrónimos

RQSESE - Regulamento de Qualidade dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

EPBD - Energy Performance of Building Directive

DCV – Demand Controlled Ventilation

SBS – Sick Building Syndrome

AVAC – Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado

UE – União Europeia

VRP – Ventilation Rate Procedure

IAQP – Indoor Air Quality Procedure

PC – Proportional Control

PID – Proportional Integrative Derivative

CAV – Constant Air Flow

VAV – Variable Air Flow

UTA – Unidade de Tratamento de Ar

UTAN – Unidade de Tratamento de Ar Novo

BLAST - Buildding Loads and System Thermodynamics

QAI – Qualidade do ar interior

CAD - Computer-aided design

GD – Graus-Dia

Nomenclatura

A_{Du}	Área superficial de Dubois	[m ²]
A_i	Área do pavimento da zona i	[m ²]
C_{CO_2}	Coeficiente de armazenamento do CO ₂ no espaço	
C_{lp}	Limiar de proteção para a concentração de CO ₂ no ar interior	[mg/m ³] ou [m ³ / m ³]
C_p	Calor específico do ar	[kJ]/(Kg.K)]
$C_{int}(t_i)$	Concentração de CO ₂ no ar interior no instante t	[mg/m ³] ou [m ³ / m ³]
	Valor da concentração de CO ₂ no ar interior no instante inicial	
$C_{int}(t_{i-1})$	de cada incremento de tempo considerado no cálculo numérico	[mg/m ³] ou [m ³ / m ³]
$C_{s-atual,i}$	Concentração de CO ₂ existente no espaço	[ppm]
$C_{s-dim,i}$	Concentração de CO ₂ no espaço para as condições dimensionadas	[ppm]
$C_{s-min,i}$	Concentração de CO ₂ mínima	[ppm]
C_{sup}	Dióxido de carbono do caudal de ar fornecido pelo sistema AVAC	[ppm]
C_z^t	Concentração de dióxido de carbono em cada instante	[ppm]
C_{zi}	Concentração de dióxido de carbono do ar transferido entre zonas	[ppm]
C_{∞}	Concentração de dióxido de carbono do ar exterior	[ppm]
E_i	Eficácia de distribuição do ar	
E_v	Eficiência do Sistema de ventilação	
G_{CO_2}	Taxa de CO ₂ gerado pelas pessoas	[m ³ /s/pessoa]
H_b	Altura corporal	[m]
i	Índice da zona de controlo	
M	Taxa de metabolismo dos ocupantes	[met]
M_{med}	Média ponderada do nível de atividade metabólica	[met]
$\dot{m}_{OA,z,i}$	Fluxo mássico de ar exterior calculado para o total de zonas	[Kg/s]
\dot{m}_{sis}	Fluxo mássico de ar fornecido pelo Sistema AVAC	[Kg/s]
N	Número de ocupantes do espaço	

N_M	Número de pessoas no espaço com cada nível de atividade metabólica	
P_i	Número de ocupantes na zona de controlo	
Q_{AN}	Valor do caudal de ar novo	[m³/h]
$Q_{AN.1met}$	Caudal mínimo de ar novo para o nível de atividade metabólica igual a 1	[m³/h]
q_l	Fluxo de calor latente	[kW]
q_s	Fluxo de calor sensível	[kW]
$R_{a,i}$	Caudal de ar necessário por unidade de área	[m³/s-m²]
RQ	Quociente respiratório	
$R_{p,i}$	Caudal de ar novo por ocupante	[m³/s-pessoa]
t	Instante genérico, ou instante final de cada incremento de tempo considerado no cálculo numérico	[h]
T	Média entre a temperatura exterior e interior	[°C]
$V_{bz,i}$	Caudal de ar necessário na zona ocupada	[m³/s]
$V_{dz,i}$	Caudal de ar fornecido à zona	[m³/s]
V_{ps}	Caudal de ar insuflado pelo Sistema	[m³/s]
V_{ot}	Caudal de ar novo efetivo na zona ocupada	[m³/s]
$V_{ot,i}$	Caudal de ar novo insuflado para a condição de $C_{s-atual,i}$	[m³/s]
$V_{ot-dim,i}$	Caudal de ar novo necessário para para $C_{s-dim,i}$	[m³/s]
$V_{ot-min,i}$	Caudal de ar novo mínimo para a condição de $C_{s-min,i}$	[m³/s]
$V_{oz,i}$	Caudal de ar novo efetivo na zona ocupada	[m³/s]
V_{O_2}	Taxa volumétrica de consumo de oxigénio	[mL/s]
V_z	Volume da zona	[m³]
W_b	Massa corporal	[Kg]
X_s	Fração de ar exterior incorrigido Fração de ar exterior incorrigido	
Z	Número de zonas controlado pelo sistema AVAC	
$Z_{d,i}$	Fração de ar novo insuflado na zona	
ρ_{ar}	Densidade do ar	[Kg/m³]
Δt	Diferença de temperatura do ar exterior e interior	[K]
ΔW	Diferença da humidade entre o ar exterior e o ar interior	[Kg _{água} /Kg _{arseco}]

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A crise petrolífera de 1970 provocou a primeira onda de eficiência energética na União Europeia. A necessidade de garantir uma maior segurança energética foi uma preocupação primordial. Desde então têm vindo a ser criadas políticas de promoção de eficiência energética tendo em vista a diminuição dos consumos e consequente redução da dependência energética dos estados membros. [1]

Os edifícios têm vindo a ter especial destaque na promoção de medidas de eficiência energética, uma vez que representam cerca de 40% do consumo de energia total na União Europeia [2], onde se prevê que este consumo aumente uma vez que se trata de um setor em expansão. Daí a necessidade de existir legislação que regule o comportamento dos edifícios e funcionamento dos sistemas de climatização.

Em Portugal, a primeira legislação foi criada em 1990 através do Decreto Lei n.º40/90, onde foi apresentado o Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios, tendo como objetivo principal melhorar a qualidade térmica da envolvente mediante intervenção na conceção em projeto e na construção dos edifícios. [3] Já em 1992, foi criado o Regulamento de Qualidade dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RQSECE), que vinha regulamentar os sistemas de aquecimento e arrefecimento dos edifícios. O qual mais tarde, com o lançamento do Decreto Lei n.º 118/98, foi revisto e então aprovado o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE). Este documento procurava introduzir medidas de racionalização de consumos, fixando limites à potência máxima dos sistemas a instalar num edifício para, sobretudo, evitar o seu sobredimensionamento, conforme a prática do mercado mostrava ser comum, contribuindo assim para a sua eficiência energética, evitando investimentos desnecessários. Com o aumento da procura de sistemas de climatização, tanto no setor residencial, como no setor de serviços, houve efetivamente um aumento do consumo de energia nos edifícios. Contudo, a não existência de requisitos e exigências quanto a valores mínimos de renovação de ar, o pouco controlo e manutenção dos sistemas após implementação, levaram ao aparecimento de problemas de qualidade do ar interior. É então, neste enquadramento que se procedeu à revisão do RSECE, onde se pretende impor regras, não só de eficiência dos sistemas de climatização, que permitem melhorar o seu

desempenho energético efetivo e garantir os meios para a manutenção de uma boa qualidade do ar, como também, de monitorizar com regularidade as práticas de manutenção dos sistemas de climatização, tendo sempre em vista este duplo objetivo, o de melhorar o desempenho energético dos sistemas de climatização e consequente aumento da sua eficiência, como também de garantir a qualidade do ar interior. O RSECE exigia também a adoção de algumas medidas de racionalização energética, em função da potência dos sistemas, e considerava à necessidade da prática de certos procedimentos de receção após a instalação dos sistemas e de manutenção durante o seu funcionamento normal. [4] Desde a introdução de valores mínimos de caudal de ar novo por ocupante ou por m² de área ocupada, que têm vindo a ser feitos estudos no sentido de otimizar estes valores e verificar a sua eficiência tanto em termos de qualidade do ar, como em termos de consumos energéticos, uma vez que este método pode levar a sobreventilação dos edifícios e desta forma desperdiçar energia desnecessariamente.

Atualmente a Diretiva EPBD reformulada [2], para além de clarificar alguns dos princípios da diretiva anterior, veio introduzir novas disposições que reforçam o quadro de promoção do desempenho energético nos edifícios, à luz daquilo que são as metas e desafios comuns acordados pelos Estados-Membros para os horizontes temporais de 2020 e 2050. A definição de requisitos e a avaliação de desempenho dos edifícios passa a assentar explicitamente em pilares fundamentais: comportamento térmico e eficiência dos sistemas, no caso de edifícios de habitação, acrescidos da qualidade do ar interior e da instalação, condução e manutenção de sistemas técnicos, no caso de edifícios de serviços. Para cada um destes pilares são definidos princípios gerais, concretizados depois em requisitos específicos para as situações de edifícios novos, edifícios sujeitos a intervenção e edifícios existentes. Neste contexto, surge igualmente o conceito de edifício com necessidades quase nulas de energia, o qual passará a constituir padrão mínimo para a nova construção a partir de 2020 (2018 para edifícios públicos) e uma referência para as grandes intervenções no edificado existente. Este padrão conjuga a redução, na maior extensão possível e suportada numa lógica de custo-ótimo, das necessidades energéticas do edifício, com o abastecimento energético com recurso a energia de origem renovável. É reconhecida a relação da qualidade do ar interior com os elementos e estratégias que influenciam o desempenho energético nos edifícios, incluindo as soluções construtivas e os sistemas técnicos instalados, bem como a necessidade da sua manutenção em condições de higiene. A ventilação tem um papel crucial na promoção do conforto e saúde dos ocupantes do edifício, uma vez que é através da introdução de ar novo que é possível diluir a concentração de contaminantes. A má qualidade do ar pode afetar o desempenho dos ocupantes na realização de tarefas [5], onde a criação de estratégias de controlo das renovações do ar interior se torna vital para garantir uma boa qualidade do ar.

A concentração de CO₂ tem sido amplamente utilizada como um indicador de qualidade do ar interior. Isso significa que para edifícios concebidos para servir pessoas, como edifícios comerciais e edifícios residenciais, onde as pessoas são a fonte primária de contaminantes do ar interior, A concentração de CO₂ do ar, pode providenciar com relativa precisão o nível de contaminantes do ar interior que é proporcional à concentração de CO₂. Assim, com base nesta suposição, é desenvolvido o uso de concentração de CO₂ como parâmetro de controlo para regular a taxa de ventilação. Este método é chamado DCV, Ventilação Controlada pela Demanda.

A diretiva EPBD reformulada foi transposta para a legislação portuguesa através do recentemente publicado Decreto-Lei n.º 118/2013, que veio estabelecer um novo método de cálculo do caudal de ar novo a introduzir nos espaços, onde deixa de ser calculado através de valor mínimo por ocupante ou por m² consoante a tipologia do edifício, e passa a ser calculado através de dois métodos, o método analítico e o método prescritivo. O método analítico, traduz a aplicação da evolução temporal de dióxido de carbono (CO₂) previsível no espaço, em função do respetivo perfil de ocupação, perfil de ventilação e das características físicas dos ocupantes. Já o método prescritivo, baseia-se na determinação dos caudais de ar novo que garantem a diluição da carga poluente devido aos ocupantes do espaço e em função do tipo de atividade física (atividade metabólica) aí desenvolvida, ou devido ao próprio edifício e em função do tipo de materiais usados na construção, nos revestimentos das superfícies e no mobiliário.[6]

1.2. Objetivo do Trabalho

O objetivo da presente dissertação prende-se em caracterizar as exigências da nova Regulamentação Portuguesa Revista, no que se refere às exigências de qualidade do ar interior. Analisando a evolução temporal dos níveis de CO₂ em função da ocupação e do caudal de ar novo insuflado. Neste sentido pretende-se também, analisar o potencial de ferramentas computacionais de simulação dinâmica (como por exemplo o *EnergyPlus*), no estudo de sistemas e estratégias de controlo da ventilação numa perspetiva de manutenção da qualidade do ar interior, em função da concentração de CO₂.

1.3. Revisão Bibliográfica

1.3.1. Qualidade do Ar Interior

A qualidade do ar interior é normalmente definida e quantificada tendo em conta a concentração de poluentes selecionados que têm impacto na saúde e desempenho dos ocupantes. A concentração de poluentes pode ser quantificada, tanto em massa por unidade de volume por exemplo miligramas por metro cúbico [mg/m^3], como em partes de poluente por milhão [ppm]. [7] A Tabela 1 contém alguns dos principais tipos de poluentes que se podem encontrar no ambiente interior de um edifício. Estes poluentes podem ter origem no interior do edifício, ou estar relacionados com o ambiente exterior em que o edifício se encontra. A qualidade do ar interior está relacionada com vários parâmetros como a temperatura, humidade relativa, velocidade do ar e níveis de contaminantes, como o fumo do tabaco, odores, bactérias, fungos, compostos orgânicos voláteis (COV's). [8]

Tabela 1 – Principais tipos de Poluentes do ar Interior [8]

<i>Tipo de Gás</i>	<i>Exemplos</i>
Gases:	
Orgânicos	Componentes Orgânicos Voláteis (COVs) Hidrocarbonetos orgânicos policíclicos (HAPs) Componentes orgânicos voláteis
Inorgânicos	microbianos Dióxido de Carbono (CO_2) Dióxido de Nitrogénio (NO_2) Ozono (O_3)
Partículas:	
Bioaerossóis	Bolor, vírus, bactérias, pólen
Inorgânicas	Matéria biológica morta
Radão	Gás Radioativo

1.3.2. Origem dos Contaminantes

Os contaminantes do ar interior têm origens provenientes, tanto do interior do edifício, como da atmosfera exterior. Consoante a proveniência dos contaminantes, adotam-se estratégias de controlo de forma a assegurar boas condições de qualidade do ar interior. O ar exterior é essencial para assegurar boas condições de conforto e parâmetros de qualidade do ar interior, no entanto tratar esse ar tem custos, e por vezes não é feito de forma eficaz, o que acontece em muitos edifícios que são, ventilados naturalmente, que contêm muitas infiltrações, ou que têm sistemas de extração mecânica. Os poluentes exteriores estão normalmente associados à indústria e ao tráfego automóvel. No entanto, podem ter outras origens, provenientes da natureza, como grandes quantidades de pó e gases associados à atividade vulcânica, como também ocorrência de gás radão que se penetra nos edifícios podendo ter consequências na saúde dos ocupantes. [9] A maioria dos poluentes provêm de variadas fontes e atividades no interior do edifício. Podem ser emitidos devido a operações de limpeza e manutenção de equipamentos, relacionados com atividades e metabolismos dos ocupantes, provenientes dos materiais de construção do próprio edifício ou até devido aos sistemas AVAC. Um vasto número de poluentes podem estar presentes num determinado espaço, onde muitas vezes se desconhece o efeito toxicológico que estes provocam no ser humano. Alguns poluentes podem ser tolerados a baixas concentrações, enquanto outros podem ser extremamente tóxicos. [10]

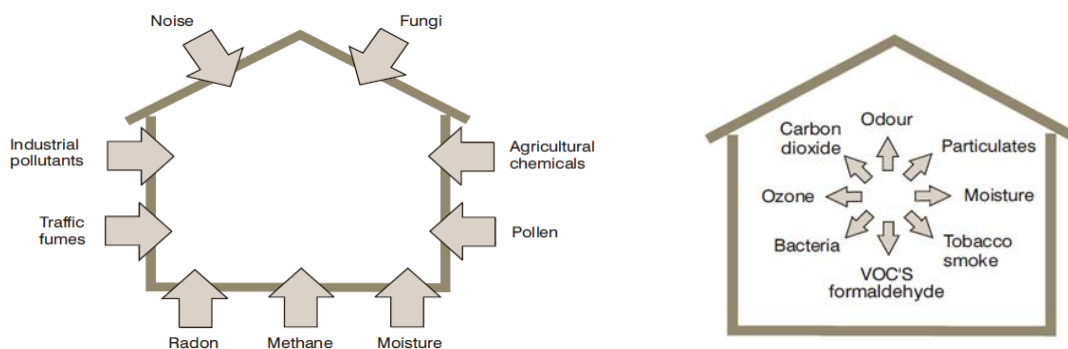


Figura 1 – Poluentes típicos dependendo da sua origem exterior/interior [9]

1.3.3. Controlo da Qualidade do Ar Interior

Uma forma de controlar a qualidade do ar interior é através da introdução de ar novo com o objetivo de diluir a concentração de poluentes. Sendo que o propósito da ventilação é o de criar condições ótimas em termos de qualidade do ar interior e conforto térmico em ambientes interiores, tendo em atenção a saúde, conforto e produtividade dos seus ocupantes. [9] A qualidade do ar interior tem um impacto significativo no comportamento humano. Baixos níveis de renovação do ar, podem resultar num aumento dos poluentes gerados no interior de um edifício, que por sua vez provocam, sintomas de SBS – *sick building syndrome*, sensação de saturação do ar, efeitos na saúde humana, e ter influência na produtividade. [11]

O controlo da qualidade do ar interior pode ser feito através de vários métodos, como por exemplo:

- Controlo da emissão ou fonte de contaminantes.
- Sistema de exaustão local
- Renovação do ar através de ventilação mecânica
- Sistema de filtros de partículas
- Manutenção e limpeza dos sistemas AVAC

É geralmente aceite que a forma mais eficaz de controlar a exposição de um poluente do ar no interior de um edifício, é eliminando a fonte do poluente. Assim que esta estratégia é implementada, a ventilação pode ser usada para reduzir e controlar a exposição desse mesmo contaminante. [12] A renovação do ar através de ventilação mecânica, é um processo que se vê constantemente em edifícios públicos e de serviços, onde a principal fonte de contaminantes são os ocupantes no seu interior. Para uma dada taxa de emissão de poluentes, a concentração em estado estacionário de um dado poluente depende da taxa de ventilação de ar novo. À medida que a taxa de renovação do ar aumenta, a concentração de poluentes diminui. No entanto, o aumento da taxa de renovação do ar tem consequências nos consumos energéticos, uma vez que o ar exterior necessita de ser climatizado. [10]

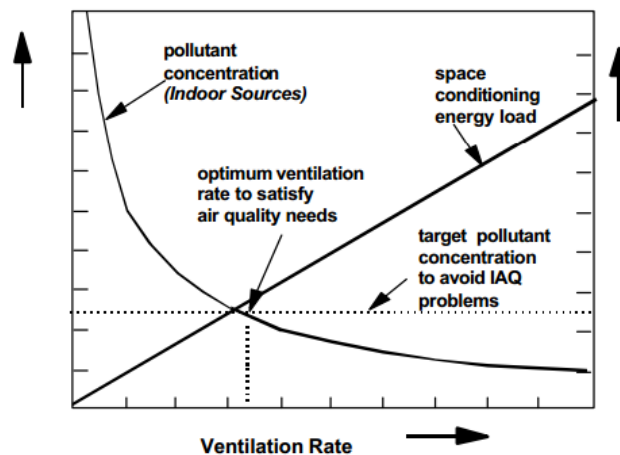


Figura 2 – Características da ventilação em função dos contaminantes [10]

1.3.4. CO₂ na atmosfera

O CO₂ é um dos principais compostos na nossa atmosfera. É também citado por muitos como sendo um indicador do crescimento dos gases de efeito de estufa e do aquecimento global. O site [17], utilizado como referencia dos níveis de CO₂ atmosféricos em diferentes locais do planeta, mostra a evolução dos níveis de CO₂ ao longo dos anos na atmosfera. Analisando esses dados, observa-se que existe um aumento de 1 a 2 [ppm] por ano ao longo da última década. A concentração de CO₂ no exterior é influenciada pela combustão de produtos, por exemplo para sistemas de aquecimento, tráfego rodoviário e pela indústria. Dependendo da localização geográfica e da proximidade com fontes emissoras de dióxido de carbono, o valor da concentração pode chegar aos 500 [ppm], ou até ao 800 [ppm]. Hoje em dia, para efeitos de cálculo, um valor comum para a concentração de CO₂ no ar exterior é de 380 [ppm]. [18]

Devido ao baixo peso molecular do CO₂, este rapidamente se difunde num espaço aberto. Como resultado disso a concentração de CO₂ tende a ser uniforme em grandes regiões geográficas. Devido a esta consistência, é possível usar o CO₂ como base de referência para controlar o caudal de ar novo a introduzir pela ventilação. [19]

1.3.5. Geração de CO₂

Embora não seja essencial para a aplicação de uma estratégia de controlo da ventilação através dos níveis de concentração de CO₂, é certamente um aspeto relevante perceber como é que o CO₂ é produzido pela ocupação no interior de um edifício.

A geração de dióxido de carbono pode ser determinada pelo quociente respiratório (RQ), e a taxa volumétrica de consumo de oxigénio, indicada na equação (1). O quociente respiratório (RQ) é o rácio molar entre o dióxido de carbono produzido e o oxigénio consumido aquando da respiração. Para um nível de atividade baixo ou sedentário, esse valor é igual a 0,83 e acresce para 1 quando o nível de atividade é de grande intensidade física. A taxa de consumo volumétrica de oxigénio, está relacionada com o nível de atividade e com a superfície de *Dubois*. A superfície de *Dubois* é a área superficial do corpo humano, indicada na equação (3), onde esta demonstra a relação entre a área corporal e a massa e altura da pessoa.

$$G_{CO_2} = RQ \frac{V_{O_2}}{1000} \quad (1)$$

$$V_{O_2} = RQ \frac{0,0476 A_{Du} M}{0,23RQ + 0,77} \quad (2)$$

$$V_{O_2} = 0,202 H_b^{0,725} W_b^{0,425} \quad (3)$$

Onde G_{CO_2} é a taxa de CO₂ gerado pelas pessoas em [l/s/pessoa], RQ é o quociente respiratório, V_{O_2} é a taxa volumétrica de consumo de oxigénio [mL/s], M é o nível de atividade [met], A_D é a área superficial de Dubois [m²] H é a altura corporal em [m] e W a massa corporal [Kg]. O nível de atividade física é caracterizado pelo calor produzido por unidade de área, onde 1 [met] = 58,2 [W/m²]. Para um adulto médio sedentário, a taxa de geração de CO₂ é de 0,00495 [l/s], valor predito pelas equações (1)-(3). [8]

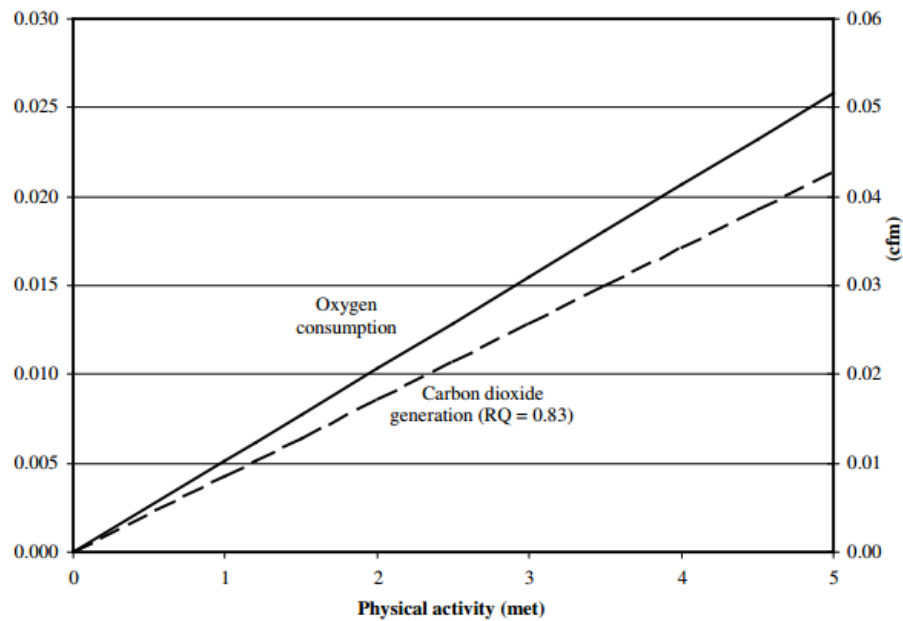


Figura 3 – Geração de CO₂ e O₂ em função da atividade física (para um adulto médio) [8]

A depleção de oxigénio por vezes é citado queixa de maus níveis de qualidade do ar interior em edifícios. Baseando no consumo do oxigénio, determinado na equação (2), a falta de oxigénio raramente se deve a baixos níveis de ventilação. Dado um nível de atividade correspondente a trabalho de escritório, cerca de 1,2 [met], o consumo de oxigénio de um indivíduo é de 0,006 [l/s]. Estabelecendo-se um caudal de ar novo de 7,5 [l/s] por pessoa, a concentração de oxigénio, em estágio estacionário no interior do edifício, decresce de 21% para 20,9%. Se o caudal de ar novo for reduzido para 2,5 [l/s] por pessoa, a concentração de oxigénio do ar passa de 21% para 20,8%. A redução da concentração de oxigénio, não prejudica a saúde humana até que os níveis de oxigénio passem abaixo dos 19,5% o que corresponde a um caudal de ar novo de 0,4 [l/s] por pessoa. Tais níveis de concentração não se encontram tipicamente em espaços interiores, a não ser que num espaço confinado o oxigénio esteja a ser substituído por outro gás, ou em caso de incêndios. [16]

1.3.6. Dióxido de Carbono como indicador de Qualidade do Ar

A temperatura do ar é utilizada normalmente como um indicador das condições térmicas ambientes e da produtividade. Outro fator que produz desconforto é a concentração de dióxido de carbono. [13]

A presença deste gás em ambientes interiores está diretamente relacionada com a respiração e com o metabolismo humano. Neste processo é consumido oxigénio e gerado CO_2 , a taxas que dependem do nível de atividade, tamanho corporal, e dieta alimentar. A relação entre a concentração de CO_2 e a qualidade do ar interior vem do facto de que as pessoas ao mesmo tempo que geram CO_2 , produzem odores provocados por bio efluentes, umas vez que ambos dependem da atividade física. O dióxido de carbono e o odor proveniente dos bio efluentes, num determinado espaço exibem uma relação similar com o número de ocupantes e a taxa de caudal de ar novo. [14] O gráfico da Figura 4 mostra o caudal de ar necessário em renovações por hora, em função da concentração de CO_2 admissível e o nível de atividade, para manter as concentrações de dióxido de carbono num nível definido. [15]

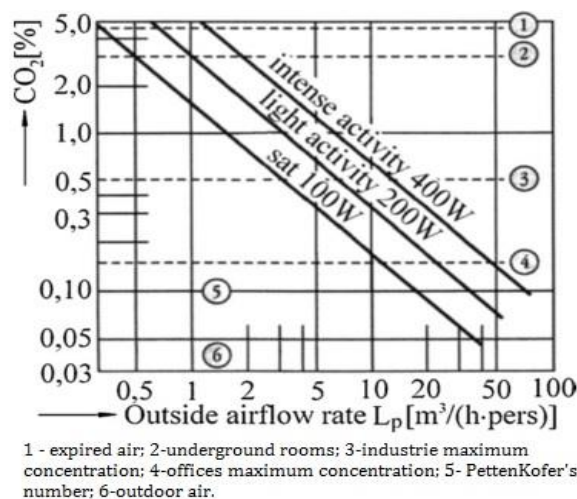


Figura 4 – Caudal de ar exterior em função dos limites de concentração de CO_2 [15]

É considerado que o ar está contaminado quando a percentagem de dióxido de carbono se encontra entre 0,1% e 0,15%, o que corresponde a 1000 e 1500 [ppm] respetivamente. Sendo que este se torna prejudicial para o corpo humano em concentrações a partir dos 2,5%. O ar atmosférico contém normalmente 0,032% a 0,035%, chegando aos 0,04% em ambientes urbanos. [15]

O dióxido de carbono não é geralmente considerado perigoso para a saúde humana nas concentrações normalmente encontradas nos edifícios. Sendo que o valor limite para exposição ao CO_2 é de 9000 $[\text{mg}/\text{m}^3]$ (5000 [ppm]), onde em períodos curtos, cerca de 15 minutos, o valor limite é de 54 $[\text{mg}/\text{m}^3]$ (30000 [ppm]). [16] A Tabela 2 mostra o efeito que os vários níveis de concentração de CO_2 têm na saúde humana.

Tabela 2 – Efeito do CO_2 do ser humano [13]

Concentração de CO_2		Efeito
[%]	[ppm]	
3	30000	Respiração profunda
4	40000	Dores de Cabeça, enjoos, emoções psicológicas
6	50000	Após exposição de 0,1...1 hora pode levar à morte
8... 10	80000...100000	Morte súbita

1.3.7. Relação entre a Ventilação e o dióxido de Carbono

O esquema abaixo representa um espaço de um edifício, condicionado por uma unidade de tratamento de ar, onde tipicamente o espaço se encontra sobre pressão, logo não existem infiltrações de ar sem ser pela conduta de insuflação. A concentração de dióxido de carbono no volume de controlo, resulta do balanço de massa entre o CO_2 gerado pela ocupação e a diferença entre o CO_2 do ar exterior. [8]

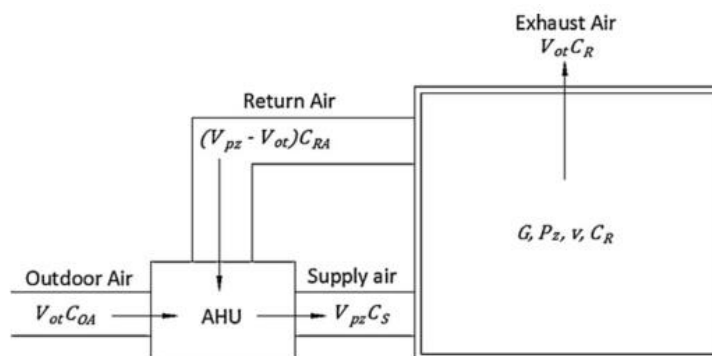


Figura 5 – Volume de controlo para uma única zona [8]

Portanto, assumindo uma densidade constante do ar, o balanço de massa no volume de controlo é dado por:

$$V_z \frac{dC_R}{dt} = G_{CO_2} P_Z + V_{pz} C_S - (V_{pz} - V_{ot}) C_{RA} - V_{ot} C_R \quad (4)$$

Onde V_z é o volume [m^3], C_R é a concentração de CO_2 no compartimento à altura dos ocupantes [ppm], P_Z é o numero de [pessoas], V_{pz} é o caudal fornecido ao volume de controlo [l/s], C_S é a concentração de CO_2 no caudal fornecido [ppm], V_{ot} é o caudal de ar novo [l/s], C_{RA} é a concentração de CO_2 na conduta de extração [ppm], e G_{CO_2} é a taxa de geração de CO_2 pela ocupação.

O balanço de massa de CO_2 na Unidade de tratamento de ar é dado por:

$$V_{ot} C_{OA} + (V_{pz} - V_{ot}) C_{RA} = V_{pz} C_S \quad (5)$$

Substituindo na (4) obtém-se:

$$V_z \frac{dC_R}{dt} = G_{CO_2} P_Z + V_{ot} C_{OA} - V_{ot} C_R \quad (6)$$

Substituindo a Eq(5) na Eq(4), onde C_{OA} é a concentração de CO_2 do ar exterior [ppm]. Assumindo que a taxa de geração de CO_2 e a renovação do ar é constante ao longo do tempo, a solução da equação diferencial de primeira ordem na Eq(6) pode ser encontrada analiticamente para a concentração de CO_2 em função do tempo:

$$C_R(t) = C_{OA}(t) + \frac{G_{CO_2} P_Z}{V_{ot}} (1 - e^{-V_{ot}t/v}) \quad (7)$$

O sistema vai atingir o estado estacionário de concentração de CO_2 , e uma relação de proporcionalidade inversa entre esse estado estacionário de CO_2 e a taxa de ventilação pode ser dado por:

$$V_{ot} = \frac{G_{CO_2} P_Z}{C_R - C_{OA}} \quad (8)$$

A Figura 6 mostra a forma como a concentração de CO_2 evolui em espaços tipo escritório, com pouca densidade ocupacional, assumindo um concentração exterior de 400 [ppm]. Cada linha representa a forma como a concentração de CO_2 evolui de acordo com o caudal de ar novo. O

ponto onde a concentração termina, representa o ponto de equilíbrio onde o CO_2 produzido pela ocupação está em equilíbrio com a taxa de diluição do espaço. Qualquer caudal de ar novo estabelecido de acordo com o nível de ocupação tem um ponto de equilíbrio que pode servir como base para usar como estratégia de ventilação de acordo com os níveis de CO_2 . [20]

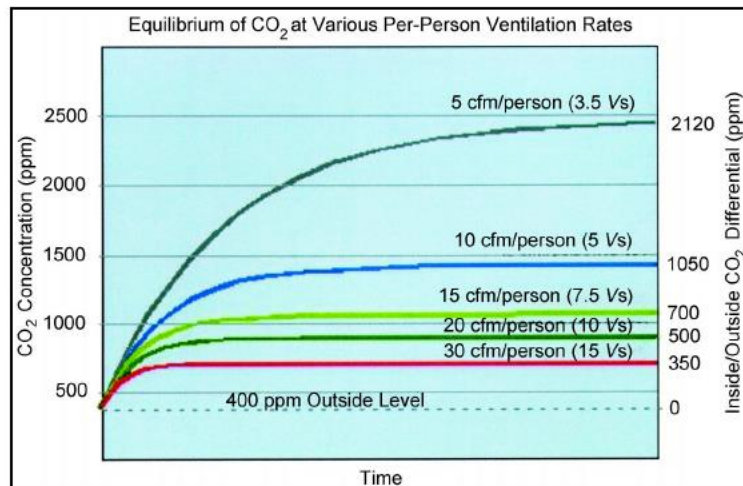


Figura 6 – Concentração do CO_2 de acordo com o caudal de ar novo por pessoa [20]

1.3.8. Consumo energético associado à ventilação

O ar exterior introduzido nos edifícios constitui uma grande parte dos consumos totais inerentes à climatização de um edifício. Sendo esta uma das razões para se tentar diminuir o caudal de ar novo para o mínimo necessário. Normalmente as renovações de ar representam cerca de 20% a 50% dos consumos térmicos de um edifício. A renovação do ar aumenta a carga térmica de um edifício em vários aspetos, uma vez que o ar exterior introduzido necessita de ser aquecido ou arrefecido consoante o desfasamento das condições exteriores com as condições de conforto estabelecidas para um dado espaço climatizado. [21]

Uma vez que o volume específico do ar varia consideravelmente, os cálculos são mais precisos quando feitos em base mássica em vez de base volúmica. No entanto, caudais volúmicos são necessários para selecionar e dimensionar componentes e sistemas de ar condicionado. Um valor típico utilizado é o volume específico do ar 1,2 [$\text{Kg ar seco}/\text{m}^3$] (0,833 [$\text{m}^3/\text{Kg ar seco}$]), valor obtido a condições de temperatura de saturação de 16°C e temperatura de ar seco de 21°C, à pressão de 101,325 [Kpa]. Uma vez que o ar passa pelos equipamentos a uma densidade perto do valor típico para locais abaixo dos 300 [m] de altitude, não são

necessárias correções para efeitos de cálculo. Quando o caudal de ar é medido em condições definidas como à entrada ou saída de um permutador, ou conduta, o volume específico pode ser obtido através do diagrama psicrométrico. Para grandes elevações, os caudais mássicos devem ser obtidos através de diagramas psicrométricos correspondentes, ou ajustados através de algoritmos.[21]

O fluxo de calor sensível necessário para arrefecer ou aquecer o ar exterior é dado por:

$$q_s = \rho_{ar} E_v C_p \Delta t \quad (9)$$

Onde:

- q_s – Fluxo de calor sensível, [W]
- ρ_{ar} – Densidade do ar, [Kg/ m³]
- E_v – Eficiência do Sistema de ventilação
- C_p – calor específico do ar [J/(Kg.K)]
- Δt – diferença de temperatura do ar exterior e interior, [K]

Sendo que ao nível do mar, com um ajustamento para níveis típicos de humidade encontrada no interior dos edifícios, esta mesma equação é apresentada para efeitos de cálculo de projeto como:

$$q_s = 1230 Q \Delta t \quad (10)$$

As renovações do ar provocam também uma alteração da humidade do ar interior. A taxa de consumo energético, associados à carga latente do ar exterior é dado por:

$$q_l = \rho_{ar} E_v C_p \Delta W (2501 + 1,805 t) \quad (11)$$

Onde:

- q_l – fluxo de calor latente, [kW]
- ΔW – diferença da humidade entre o ar exterior e o ar interior [Kg_{água}/Kg_{arseco}]
- t – média entre a temperatura exterior e interior, [°C]

O cálculo da carga latente, a alturas próximas do nível do mar, e condições próximas das temperaturas de conforto, a expressão pode ser simplificada e dada por:

$$q_l = 3,01 \times 10^6 Q \Delta W \quad (12)$$

Enquanto que na teoria, calcular o impacto energético da ventilação é direto, na prática quantificar o consumo energético associado à ventilação já se torna uma tarefa difícil. Isto acontece porque, apesar do clima exterior (vento e temperatura) ser normalmente conhecido, não há certezas sobre o nível de trocas de ar que ocorrem no edifício e da temperatura do ar interior que é mantida durante os períodos de aquecimento e arrefecimento. Dadas estas incertezas, é necessário basear as estimativas de consumos energéticos por parte da ventilação em suposições sobre as taxas de ventilação e o clima interior. De forma a estimar o impacto que a ventilação tem nos consumos energéticos, é necessário saber:

- O caudal de ar que entra e sai do edifício
- A diferença entálpica entre o fluxo de ar insuflado e extraído.

Alternativamente, o impacto da ventilação pode ser avaliado através de balanço energético, em que as perdas pela envolvente são subtraídas dos ganhos térmicos do edifício.

Para além dos consumos térmicos, o consumo de energia elétrica também está associada à ventilação por parte dos ventiladores nos sistemas de ventilação mecânica. Normalmente em bons projetos é o consumo por parte destes sistemas é de 1 [Watt] por cada [l/s] insuflado, sendo que este valor pode ser de 3 ou mais [watts] em sistemas ineficientes que fornecem o mesmo caudal de ar. [9]

O gráfico da Figura 7 mostra a comparação dos consumos de acordo com o clima, e os sistemas de ventilação mecânica. As duas colunas sombreadas representam o caudal de ar novo típico por ocupante.

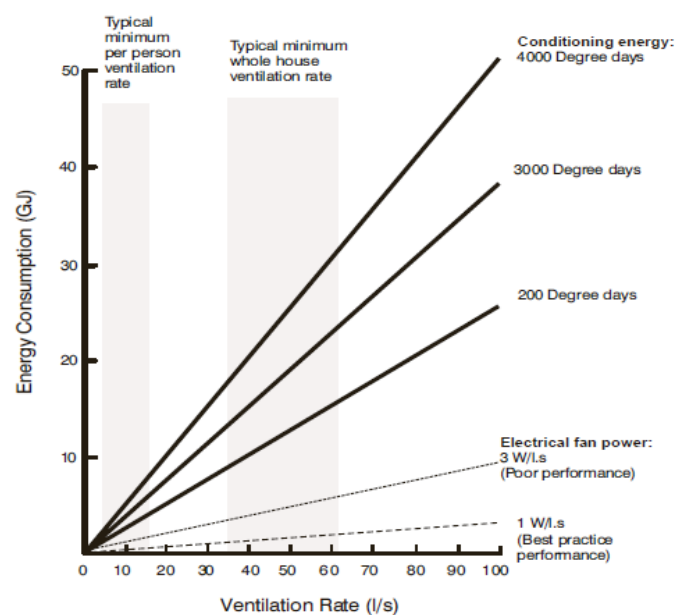


Figura 7 – Exemplos do impacto energético [9]

1.3.9. Estratégia DCV

O termo DCV (*Demand Control Ventilation*) é utilizado para referir uma estratégia de controlo da ventilação de acordo com a demanda. A estratégia de controlo DCV faz variar o caudal mínimo de ar novo a introduzir num edifício baseando-se na ocupação. Atualmente a forma mais económica que existe para medir a ocupação em edifícios, é através do uso de sensores de dióxido de carbono (CO_2), isto porque na maioria dos edifícios, a ocupação não é registada em tempo real, sendo assim, é necessário utilizar o dióxido de carbono como indicador da ocupação. Antes da introdução desta estratégia, os sistemas AVAC eram dimensionados de forma a fornecerem ar novo para o máximo de ocupação característico de uma dada tipologia de edifício. Atualmente a comunidade da indústria AVAC, apercebe-se que em grande parte do tempo os edifícios não estão com ocupação máxima sendo assim, durante esse tempo é possível reduzir o caudal de ar novo, através de implementação de uma estratégia DCV. [22]

A estratégia DCV pode ter várias formas de prever a ocupação e assim estabelecer o melhor controlo, tais como [23] :

Estipular um horário de ocupação típico – Este método consiste em pré-definir um horário de ocupação no controlo DCV. Se o nível de ocupação variar de forma previsível diariamente para os vários dias da semana, através de métodos estatísticos é possível estabelecer um horário de ocupação, e assim controlar o caudal de ar novo. Este método é o mais económico de implementar o DCV em edifícios com padrões de ocupação previsíveis.

Utilização de sensores de infravermelhos – O uso de infravermelhos instalados num espaço permite verificar se este está ocupado ou não. O sistema de ventilação é controlado numa base *on/off* onde, consoante o sinal do sensor o sistema fornece um caudal de ar novo pré-dimensionado para a tipologia do espaço. Este método é simples e efetivo, mas é possível que ocorra sobreventilação, uma vez que não é controlado pelo número de ocupantes.

Monitorização dos níveis de CO_2 – Esta abordagem tem atraído muitos interesses na última década. O número de ocupantes pode ser estimado em tempo real indiretamente

através dos níveis de CO₂. Assumindo que os ocupantes são a fonte principal de dióxido de carbono, pode-se fazer uma aproximação do número de ocupantes considerando uma taxa de geração de CO₂ por ocupante. O caudal de ar novo é ajustado com base na estimativa da ocupação em tempo real.

Medição direta do número de ocupantes – Ao instalar sensores de monitorização é possível detetar a entrada e saída de pessoas de um determinado espaço e saber a ocupação em tempo real. No entanto, este método não tem sido utilizado nos edifícios atuais, devido à falta de meios económicos necessários para a instalação desta tecnologia. Recentemente, o uso de identificação por radiofrequência (RFID) instalado nos cartões de identificação, permite detetar o número exato de ocupantes e assim otimizar o caudal de ar novo de forma instantânea. [24] Com o rápido desenvolvimento de tecnologias ubíquas para edifícios, é esperado que este tipo de tecnologias do tipo DCV, seja largamente utilizado num futuro próximo.

1.3.10. DCV através da utilização de sensores de CO₂

Na estratégia DCV através da monitorização do CO₂ utilizam-se duas tecnologias distintas, sensores de CO₂, que monitorizam os níveis de CO₂ do ar interior do edifício, e um sistema de controlo que utiliza o sinal do sensor de CO₂ para regular o caudal de ar novo a introduzir no edifício. Uma vez que as pessoas produzem CO₂ através da respiração a uma taxa que está diretamente relacionada com o nível de atividade, é possível prever a ocupação através da diferença entre a concentração do CO₂ no interior e no exterior do edifício, e a partir daí estabelecer as necessidades de ar novo. Os sensores de CO₂ fazem monitorização do ambiente de forma contínua, o que permite que o controlo do caudal de ar novo seja feito ao longo do dia, de forma a diluir o CO₂ gerado pela ocupação. Esta é a grande diferença que existe para com o método tradicional, em que se define um caudal de ar novo mínimo fixo.

O benefício primário da implementação de uma estratégia DCV é a redução do consumo energético, uma vez que os sistemas AVAC climatizam o ar exterior introduzido no edifício em função dos set-points de temperatura e humidade. Ao diminuir o caudal de ar novo mínimo abaixo dos valores de projeto, quando os níveis de ocupação estão abaixo do esperado, reduz-se a quantidade de energia necessária para aquecer, arrefecer e desumidificar o ar exterior. Para sistemas de volume constante, a poupança energética ocorre apenas nos sistemas que

condicionam o ar, já em sistemas de volume variável, a poupança energética ocorre também na ventilação. Outros benefícios associados ao DCV estão na melhoria da qualidade do ar e controlo da humidade. Se um edifício tiver implementado uma estratégia DCV, através da utilização de sensores de CO₂, os sistemas AVAC podem servir também como monitorizadores da qualidade do ar interior, e até vir a aumentar a ventilação quando os níveis de qualidade do ar interior estão baixos. Esta situação pode ocorrer quando os níveis de ocupação são maiores do que o projetado inicialmente. Em clima húmidos, o DCV reduz o nível de humidade introduzido num espaço, o que ajuda a atenuar problemas de conforto e outros associados à humidade em edifícios. [25] Na estratégia DCV o maior potencial de poupança energética é em edifícios onde a ocupação varia durante todo o dia, onde esta é imprevisível e atinge picos de grande ocupação, por exemplo em escritórios, serviços públicos, centros comerciais, cinemas, auditórios ou até discotecas. Em edifícios onde a ocupação é mais estável, o DCV pode garantir que uma taxa de caudal de ar novo é fornecido por ocupante permanentemente. Sendo mais provável que o DCV reduza consumos energéticos, em áreas de grande utilização ocupacional e ambientes de climas exigentes. Esta estratégia pode operar conjuntamente com sistemas que utilizam economizadores e estratégias de *free-cooling* e *free-heating*, onde o ar exterior é utilizado diretamente para aquecer ou arrefecer o ar, dependendo das condições exteriores e interiores. No entanto nestes casos a poupança energética poder ser menor quando estes sistemas estão ativos, dependendo da ocupação e tipo de edifício. [26]

1.3.11. Simulação computacional da estratégia DCV

Várias ferramentas de simulação computacional estão disponíveis de forma a ajudar a prever o impacto energético do controlo da ventilação através de estratégia DCV. Uma nota de advertência é que as ferramentas de simulação computacional dependem fortemente de suposições e qualquer variação dos pressupostos utilizados na modelação e o ambiente real vão originar resultados inconsistentes. Portanto, é necessário ter em atenção em utilizar os pressupostos o mais compatível possível com a situação real. Ao modelar o DCV, as entradas mais importantes são os padrões de ocupação por hora e a densidade de ocupação. [25]

Alguns programas de simulação computacional que são utilizados para simular as estratégias DCV são descritos em baixo.

DOE-2 Building Energy Analysis Program

DOE-2 é uma ferramenta de simulação energética e uma das mais utilizadas nos Estados Unidos. Em específico a estratégia DCV foi acrescentada na versão 2.2 de forma a prever o comportamento dos sistemas AVAC com controlo do CO₂. Ao introduzir linhas de código para o *software* em formato *Building description language* (BDL), o ficheiro de entrada no programa DOE-2, que descreve cada aspeto dos sistemas do edifício, e a forma de controlo, o utilizador pode simular vários tipos de estratégia DCV que funciona para sistemas simples e de multizona. O *software* é capaz de controlar o volume de ar exterior com um sensor montado na conduta de extração para espaços simples e com vários sensores em cada espaço servido com um sistema multizona [27].

eQUEST

eQUEST, abreviatura para *Quick Energy Simulation Tool*, é um programa de interface gráfico fácil de utilizar desenvolvido pela *Energy Design Resources* que utiliza como ferramenta de cálculo o DOE-2. É popular em empresas de consultadoria energética que prestam serviços de simulação dinâmica [28].

Virtual Environment

Virtual Environment (VE), uma ferramenta de simulação desenvolvida no Reino Unido, pela *Integrated Environmental Solutions Limited* (IES), é semelhante ao *eQUEST* e permite simulação dinâmica de todo o edifício. Sendo que apresenta algumas capacidades que não estão presentes no *eQUEST* como suporte para análise de fluidos dinâmicos (CFD) [29].

EnergyPlus

O *EnergyPlus* é um programa de simulação energética que engenheiros, arquitetos, e investigadores usam para modelar o uso de energia e água em edifícios. Modelar e otimizar um edifício com o *EnergyPlus* permite aos profissionais na área melhorar o desempenho do edifício usando o mínimo de energia e água. O *EnergyPlus* permite simular, o uso de energia necessária

para o aquecimento, arrefecimento, ventilação, iluminação, energia de bombagem, e o uso de água. Este simulador inclui muitas capacidades de simulação, nomeadamente, períodos de tempo menores que uma hora, alterar sistemas modulares e sistemas integrados na zona de climatização, assim como sistemas multizona, conforto térmico, ventilação natural e sistemas fotovoltaicos.

O *EnergyPlus* é capaz de modelar a estratégia de DCV baseada na concentração de CO₂, usando vários controlos, *Ventilation Rate Procedure* (VRP), *Indoor Air Quality Procedure* (IAQP), e *Proportional Control*. O *EnergyPlus* não calcula o DCV diretamente a partir da concentração de CO₂. Em vez disso, ele converte o *set-point* de CO₂ para um caudal de ar novo necessário para manter esse limite ao assumir um valor de concentração de CO₂ do ar exterior e geração de CO₂ pelos ocupantes [30].

1.4. Contributo da tese

No presente trabalho analisam-se diferentes estratégias de controlo da ventilação de edifícios em função da concentração da CO₂, usada como indicador da qualidade do ar interior. Neste contexto explora-se e caracteriza-se o potencial de ferramentas computacionais de simulação dinâmica, em particular o *EnergyPlus*¹, no estudo de sistemas de ventilação controlados com base na medição da concentração de CO₂. Fez-se ainda uma análise crítica e comparativa das exigências da Regulamentação Portuguesa (Decreto-Lei 118/2013) e de diferentes estratégias de controlo DCV, numa perspetiva de manutenção da qualidade do ar interior, nomeadamente no que se refere à concentração de CO₂.

Propõe-se e apresenta-se ainda um protótipo funcional de baixo custo, que permite controlar os sistemas AVAC de um edifício, no sentido de conciliar os níveis ótimos de qualidade do ar interior e a eficiência energética dos sistemas de climatização, recorrendo à plataforma arduino².

¹ *EnergyPlus* – Software de simulação energética de edifícios

² Arduino - Plataforma de prototipagem eletrónica *open-source*

1.5. Organização do documento

No primeiro capítulo apresenta-se uma breve introdução envolta da necessidade de melhorar a eficiência energética em específico no setor dos edifícios, relacionando também a importância da manutenção de bons níveis de qualidade do ar interior. Apresenta-se uma revisão bibliográfica evidenciando a importância da qualidade do ar interior na saúde dos ocupantes, e a sua relação com os consumos energéticos, introduzindo-se normas e conceitos relacionados com a ventilação. Neste capítulo ainda se descreve quais os objetivos da dissertação e qual o seu contributo.

No segundo capítulo descreve-se e avalia-se qualitativamente o potencial de poupança energética de diferentes estratégias de controlo da ventilação.

O terceiro capítulo é dedicado à avaliação do potencial dos modelos incorporados no *EnergyPlus* no que respeita ao controlo DCV, fazendo-se uma análise aos valores de concentração de CO₂ num dado espaço de acordo com a estratégia DCV adotada.

O quarto capítulo faz uma descrição à nova Regulamentação Técnica no que respeita ao caudal de ar novo mínimo a introduzir pelos sistemas de climatização, fazendo-se uma análise crítica aos resultados obtidos. Faz-se também um estudo paramétrico das diferentes estratégias de controlo DCV comparativamente com o definido na nova Regulamentação Técnica.

No quinto capítulo apresentação um caso de estudo, onde se desenvolveu uma ferramenta que se testou experimentalmente nos sistemas de climatização de um edifício real.

Num último capítulo são expostas as conclusões do estudo e propostas para trabalhos futuros.

2. Estratégias de Controlo da Ventilação

Na maior parte dos edifícios, as unidades de tratamento de ar fornecem ventilação de forma constante enquanto o edifício está ocupado de forma a cumprir as necessidades de ventilação e conforto, sendo que independentemente das condições climatéricas as unidades de tratamento de ar fazem sempre aquecimento ou arrefecimento. Grande parte das unidades de tratamento de ar utilizadas atualmente contêm sistemas CAV, ou seja de caudal de ar constante, a funcionar interruptamente no horário de funcionamento. Estas unidades são dimensionadas para fornecerem um caudal de ar de acordo com a tipologia do edifício para um máximo de ocupação, no entanto, há várias horas do dia que o edifício não está com ocupação máxima e as necessidades de ventilação são mais baixas do que as que estão a ser fornecidas sendo que o caudal de ventilação não pode ser ajustado facilmente em sistemas CAV. Alguns estudos demonstraram que o controlo da ventilação pela demanda pode trazer poupanças significativas de energia em climas que não são favoráveis para utilizar economizadores. Tradicionalmente as estratégias DCV fazem modulação do registo do ar de forma a reduzir o caudal de ar exterior e aumentar o caudal de ar recirculado e assim diminuir as necessidades de energia para climatizar o ar. Esta estratégia reduz as necessidades de arrefecimento e aquecimento, mas o ventilador de insuflação continua a insuflar à potência máxima. Quando uma unidade está em modo de ventilação, onde o objetivo é apenas o de introduzir ar novo e manter os níveis mínimos de qualidade do ar, é possível diminuir o consumo do ventilador modelando a velocidade do mesmo através da aplicação de um variador de velocidade em função da estratégia DCV, reduzindo assim as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento, como também reduzir o consumo por parte do ventilador. Existem alguns tipos de controlo que podem ser utilizados numa UTA (unidade de tratamento de ar), através da análise das condições climatéricas exteriores e condições de conforto interiores. Nomeadamente através da implementação de estratégias de, economizadores (*free-cooling*), controlo da velocidade do ventilador, controlo da capacidade de arrefecimento, e estratégia DCV. [31]

2.1. Controlo com economizador (*free-cooling*)

Um sistema com controlo deste género utiliza o ar exterior, para reduzir o consumo energético associado ao arrefecimento. Quando um espaço necessita de arrefecimento e as condições do ar exterior estão favoráveis para ser utilizado diretamente (como determinado pelo controlador), o registo de ar novo “abre” e introduz um caudal superior ao definido em condições normais. Isto reduz ou elimina a necessidade de arrefecimento e consequentemente o consumo energético. Este controlo é utilizado através da medição da temperatura ou entalpia do ar exterior e do ar extraído do espaço a climatizar. Se o valor de temperatura ou entalpia do ar exterior forem inferiores ao do ar na conduta de extração, o ar exterior é utilizado parcialmente ou mesmo totalmente para ir ao encontro das necessidades de arrefecimento. Caso contrário o economizador não é utilizado e o registo de ar novo vai para o valor mínimo e introduz o menor caudal possível de forma a não gastar energia desnecessariamente. [31]

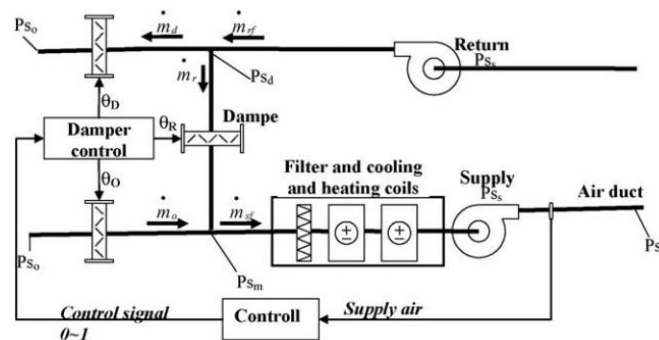


Figura 8 – Representação esquemática de um Sistema AVAC típico [31]

A Figura 8 apresenta o esquema de uma Unidade de Tratamento de ar (UTA) com um economizador instalado. Onde um controlador vai atuar sobre os registos de ar novo e ar recirculado de forma a controlar o aquecimento e arrefecimento da melhor forma. O economizador altera a sua estratégia de controlo consoante está explícito na Figura 9. Na região entre os 0% e os 100%, o economizador regula os registos de forma a controlar as condições necessárias a ir de encontro ao set-point, sendo que nesta zona, as serpentinas de aquecimento e arrefecimento são desligadas, como se vê no gráfico da Figura 9, e apenas são ligadas quando as condições exteriores não são favoráveis para usar o *free-cooling* e o registo de ar novo vai para o valor mínimo. [32]

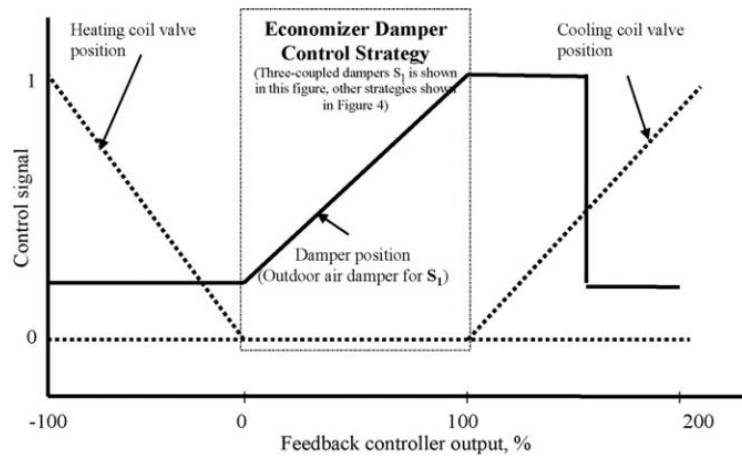


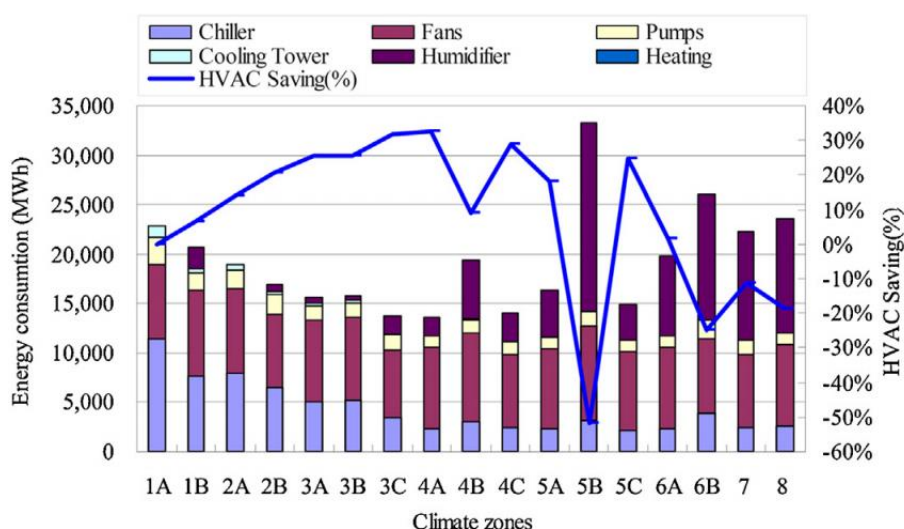
Figura 9 – Sequência de estratégia free-cooling [32]

2.1.1. Caso de estudo

Um estudo feito por Kuei-Peng Leea *et al.* [33], mostra o potencial de poupança energética da estratégia de *free-cooling* em diferentes localizações do mundo. Para isso fizeram a simulação energética de um edifício, em 17 localizações diferentes, como mostra a Tabela 3, em que a temperatura no interior do edifício foi definida como sendo de 27°C e a percentagem de ar novo máxima admitida seria de 100%. O consumo energético e o potencial de poupança nos diferentes climas está demonstrado no gráfico da Figura 10, onde nos consumos dos sistemas AVAC estão incluídos um *chiller*, uma torre de arrefecimento, sistemas de aquecimento, uma bomba e um sistema de humedificação. Os resultados mostram que é necessária desumidificação em ambientes húmidos, zona A. No entanto, desde os climas amenos até aos climas frios, zona (3B,4B, 5B e 6B), é necessária humedificação em meses que o ar é seco. As zonas climáticas 7 e 8 requerem humedificação adicional em certas estações quando o ar exterior é excessivamente seco. Sendo que aqui a estratégia de *free-cooling* resulta num aumento dos consumos em vez de os reduzir. No geral, a estratégia de *free-cooling* permite boas reduções do consumo energético em climas costeiros, do tipo C, (3C,4C, e 5C). Sendo que as três zonas com maiores poupanças energéticas foram a 4A (33%), 3C (32%), e a 4C (29%), e com menores poupanças, foram 5B (-52%), 6B (-25%), 8 (-19%), 7 (-11%), e a 1 (0%).

Tabela 3 – Dados climáticos para as diferentes locais, adaptado de [33]

Região	Zona Climática	Temperatura média [°C]	Humidade relativa média [%]	Temperatura de saturação [°C]	Entalpia média [kJ/k]	Temperatura máxima [°C]
Singapura	1A	27,5	83,6	24,3	76,7	33,9
Jodhur	1B	26,0	48,5	13,3	53,0	42,8
Taipé	2A	22,8	80,9	19,1	60,0	37,8
Cairo	2B	21,7	58,7	12,3	45,6	42,8
Argel	3A	17,7	75,3	12,7	42,4	38,3
Túnis	3B	18,8	71,6	12,9	43,7	40,0
Adelaide	3C	16,2	62,7	8,2	33,8	39,4
Brest	4A	11,2	83,7	8,4	29,2	28,9
Albacete	4B	13,5	61,8	5,2	27,5	37,9
Astoria	4C	10,3	81,1	7,1	26,8	28,3
Hamburgo	5A	9,0	79,7	5,4	24,1	32,2
Dunhuang	5B	8,2	47,7	-3,6	16,7	38,9
Victoria	5C	9,6	80,3	6,1	25,0	28,9
Moscovo	6A	5,5	77,2	1,6	18,4	30,6
Karamay	6B	9,3	52,0	-2,3	18,8	41,1
Östersund	7	3,2	74,7	-1,1	12,9	26,7
Yakutsk	8	-8,9	68,2	-13,9	-1,7	32,2

Figura 10 – Consumo energético dos sistemas AVAC, e percentagem de poupança energética com *free-cooling* [33]

2.2. Controlo DCV CO₂

A estratégia de controlo usada para controlar a ventilação através dos níveis de CO₂ é um dos pontos críticos da definição da estratégia DCV. A estratégia de controlo afeta a capacidade de resposta do sistema de ventilação ao controlar o caudal de ar novo baseado na ocupação existente, o que vai afetar significativamente a poupança energética em relação à utilização de

um caudal de ar novo fixo. A estratégia DCV envolve mais do que medir níveis de CO₂. O controlo deve ser dimensionado de forma a que o sistema garanta um caudal por pessoa capaz de garantir boa qualidade do ar com algum tempo de resposta. [19]

Há três tipos de estratégias de controlo para utilizar com o DCV, dependendo da aplicação e tipo de equipamento utilizado num dado espaço. Estas estão descritas abaixo [19], [34]:

- Controlo por *Set-Point*
- *Proportional Control*
- *Proportional-Integral-Derivative (PID)*

2.2.1. Set-Point Control

Esta estratégia é a mais simples de todas, baseada em controlo *ON/OFF*. Quando a concentração de CO₂ num determinado espaço atinge um valor pretendido, os registos de ar-novo, ou o ventilador de insuflação de ar novo são ativados. Sendo que o registo de ar novo fica aberto, ou o ventilador fica ativo, até que a concentração de CO₂ baixe até um valor mínimo definido abaixo do *set-point*. A diferença entre o *set-point* superior e o *set-point* inferior da concentração de CO₂ é chamada de zona morta. Como regra geral, este tipo de controlo é mais adequado em instalações que tenham alta densidade de ocupação onde a concentração máxima definida é atingida rapidamente.

2.2.2. Proportional Control

A quantidade de energia para aquecimento ou arrefecimento fornecida a um espaço é a base de dimensionamento de muitos sistemas de AVAC. O controlo começa quando os níveis de CO₂ no interior do edifício excedem os níveis do ar exterior, por exemplo em 100 [ppm]. Sendo que o fornecimento de ar novo para o espaço aumenta proporcionalmente até 100 % da taxa de ventilação. Comparando esta estratégia com a referida anteriormente, esta abordagem permite uma reação mais rápida em relação à variação da ocupação. Aplicações que requerem um rigor maior do controlo do ar novo devem usar esta estratégia ao invés da anteriormente referida. Esta estratégia de controlo é ideal para espaços com ocupação que varia muito e que é imprevisível, como por exemplo em bares, restaurantes e salas de conferência.

2.2.3. Proportional-Integral-Derivative

O tempo necessário para se atingir níveis de equilíbrio da concentração de CO₂ em espaços com baixa ocupação é uma desvantagem para o controlo por CO₂. Baixas densidades de ocupação, como 6 pessoas por cada 100 [m²] pode necessitar de uma hora para atingir um ponto de equilíbrio e a partir daí determinar um caudal de ar novo, sendo que variações rápidas na ocupação também pode causar este problema. O controlo da temperatura em grandes edifícios também encontra este problema, como resultado de mudanças imprevisíveis, como a temperatura exterior, ganhos solares, ganhos internos, onde o controlo simples da temperatura pode ser um problema em grandes edifícios. Uma solução para estes problemas de controlo são o controlo PID, onde estes sistemas de controlo permitem examinar a distância até ao *set-point*, o tempo que se demora a atingir o *set-point*, e a velocidade da variação em relação ao *set-point*, o que permite controlar melhor a taxa de variação da concentração de CO₂. Por exemplo, minutos depois de entrarem ocupantes num edifício, os sistemas AVAC reagem e ajustam o caudal de ar novo. Este ajustamento é baseado na ocupação em tempo real através da análise do aumento da concentração de CO₂. Em semelhança ao *proportional control* o *PID control* funciona com base na variação linear do sensor de CO₂. Controladores autónomos traduzem o sinal linear do sensor de CO₂ num sinal PID. Quando aplicado convenientemente, controladores PID fornecem uma rápida resposta às variações da ocupação. Sendo que esta aplicação é interessante em espaços com pé-direito alto, edifícios com multizona e baixa densidade, variações rápidas da ocupação, ou padrões imprevisíveis da ocupação.

Tabela 4 – Estratégia DCV recomendada de acordo com o tipo de ocupação [32]

Densidade de Ocupação [pessoas/100m ²]	Estratégia de controlo recomendada
Forte variação (maior do que 25%)	<i>PID, Proportional Control</i>
Baixa (7 ou menos)	<i>PID, Proportional Control</i>
Media (7 e 20)	<i>Proportional</i>
Alta (20 a 50)	<i>SetPoint, Proportional Control</i>

2.2.4. Casos de Estudo

Moncef Krarti *et al.* [35], avaliam o desempenho energético de estratégias de controlo da ventilação DCV, aplicadas num sistema VAV. A simulação foi feita no programa de simulação energética DOE-2, no qual se simularam 3 estratégias de ventilação em quatro cidades

diferentes de forma a avaliar a poupança energética das mesmas, onde o controlo foi aplicado num edifício tipo de escritório, para um dia típico de verão. O caso base, utiliza um caudal de ar novo fixo, determinado a partir da *ASHRAE Standard 62-2001* em que para escritórios, se definiu um caudal de ar novo de 10 [l/s por pessoa]. A segunda estratégia utiliza um controlo *On/Off*, onde se define um *set-point* da concentração de CO₂ mínimo e máximo. Quando a concentração de CO₂ no interior do espaço atinge o *set-point* máximo o registo de ar novo abre a 100%, já quando é atingido o *set-point* mínimo, este vai para 0% ou então para um mínimo fixo. E finalmente a ultima estratégia, é através de um controlo PID, onde o registo de ar novo é modelado consoante a concentração de CO₂. Como resultados, apresentados na Tabela 5 mostra o consumo energético do *chiller* dependendo significativamente da localização geográfica e estratégia de controlo. As maiores poupanças foram obtidas em Miami, com 23% para o controlo *on/off* e 24,4% para o controlo PID em relação ao caso base. Para Madison e Phoenix, as maiores poupanças obtêm-se através do controlo PID. Já para Boulder/Denver, os consumos aumentam, isto deve-se ao facto de que insuflar mais ar novo, permite gastar menos energia, do que climatizar o ar recirculado, uma vez que as condições do ar exterior se enquadram melhor com as necessidades interiores. Como análise deste estudo é que utilizar um controlo PID, permite obter maiores poupanças do que um controlo *On/Off*, sendo que em relação a um sistema VAV com caudal de ar novo mínimo fixo, é possível poupar 14% de energia para controlo *On/Off* e 21% para controlo PID.

Tabela 5 – Consumos dos sistemas AVAC para diferentes estratégias de controlo DCV [35]

Região	Equipamento	Estratégia de Controlo			Redução em modo	
		Caso Base	On/Off	PID	On/Off [%]	modo PID [%]
		45%	38,6%	35,4%	14,0	21,0
Miami	Chiller [kWh]	999,3	769,1	755,4	23,0	24,4
	Ventilador [kWh]	4453	4451	4450	0,05	0,07
Phoenix	Chiller [kWh]	629,2	532,3	521,6	15,4	17,1
	Ventilador [kWh]	4440	4469	4451	-0,6	-0,25
Denver	Chiller [kWh]	444,3	464,7	472,4	-4,6	-6,3
	Ventilador [kWh]	4455	4467	4496	-0,27	-0,92
Madison	Chiller [kWh]	552,0	489,6	480,8	11,3	12,9
	Ventilador [kWh]	4443	4443	4443	0,0	0,0

Também Xue-Bin Yang *et al.* [36], estudaram a aplicação de estratégias de controlo em sistemas VAV, e comprovou que a aplicação de uma estratégia DCV nestes sistemas permitiria poupanças energéticas de 15% tanto no verão (clima quente), como no Inverno (clima frio), mantendo sempre os níveis de qualidade do ar dentro dos parâmetros pretendidos. Comprovando assim o potencial de estratégias DCV em sistemas VAV.

O estudo paramétrico elaborado por Moncef Krarti *et al.* [35], apresentado anteriormente, mostra o potencial de poupança do controlo DCV, num sistema VAV. Já Mads Mysen *et al.* [37] estudaram o potencial de poupança da estratégia DCV em relação a um sistema CAV, onde aqui, os resultados ainda são mais benéficos, uma vez que estes sistemas por si só não permitem variação do caudal. O caso de estudo foi aplicado num edifício escolar, onde se estudou o efeito de 3 estratégias de ventilação. O caso base estabelecido foi a aplicação de um sistema CAV dimensionado para 30 ocupantes, valor típico para uma sala de aula, onde o caudal definido foi de 7 [l/s] por pessoa com adição de 1 [l/s por m²] de forma a diluir poluentes emitidos pelos materiais de construção, com um funcionamento típico de 10 horas por dia. A segunda estratégia de ventilação foi através da aplicação de DCV-CO₂, aplicando um caudal mínimo de 1 [l/s por m²] e um caudal típico para o numero de ocupantes detetados através da concentração de CO₂, sendo que quando a concentração de CO₂ fica abaixo de 700 [ppm], o caudal estabelecido é de apenas 1 [l/s por m²], caso contrario, o caudal é regulado de forma a ir ao encontro do *set-point* de 900 [ppm]. A terceira estratégia escolhida é através da aplicação de sensores de infravermelhos que deteta quando existem ocupantes, onde se dimensionou um caudal mínimo de 1 [l/s por m²] de forma constante e quando a sala está em uso utiliza-se um caudal adicional de 7 [l/s por ocupante] para 30 ocupantes.

Foi analisado o número de ocupantes que estão presentes nas salas de aula ao longo do estudo e determinou-se que o número médio de ocupantes por sala de aula foi de 22 alunos, sendo que 74% da ocupação máxima é que está efetivamente presente nas aulas e que as salas são utilizadas para atividades escolares entre 3h a 5h por dia.

Como resultados obtiveram-se que em relação ao caso base, que utiliza o sistema CAV com 10h de funcionamento diário, o controlo DCV-CO₂ é capaz de reduzir os consumos para 32% do caso base, ou seja obteve uma redução de 68%. Já o controlo feito por infravermelhos, conseguiu uma redução do consumo para 51% do caso base, ou seja uma redução de 49%. O gráfico da Figura 11 mostra a relação entre o número de horas de funcionamento dos sistemas e a percentagem de consumo dos controlos sugeridos em relação ao caso base.

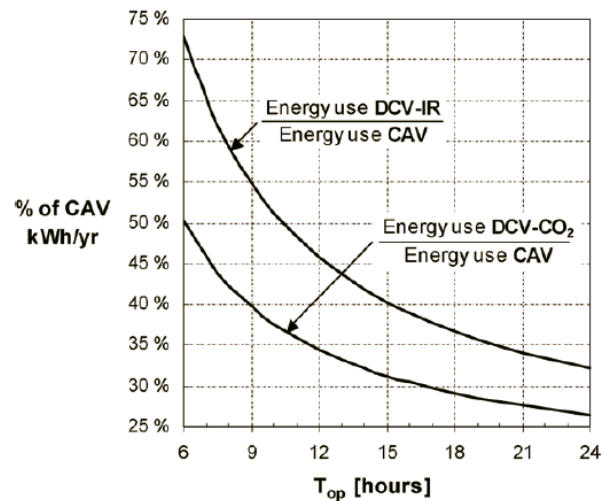


Figura 11 – Influência do período de operação na redução do consumo da estratégia DCV em relação a uma estratégia CAV [37]

Normalmente o controlo DCV, é aplicado em sistemas de ventilação mecânica, sendo que este tipo de controlo também pode ser implementado juntamente com uma estratégia de ventilação natural. Yang Wang *et al.* estudou a implementação de várias estratégias DCV, controlando o ar novo introduzido naturalmente através de abertura controlada de janelas num espaço típico de escritório [38]. As simulações foram feitas no *software* ANSYS/CFX, onde se analisaram os níveis de CO₂ no espaço consoante a estratégia escolhida, como também o consumo para aquecimento do espaço. O funcionamento do controlo da ventilação e do aquecimento está representado na Figura 12.

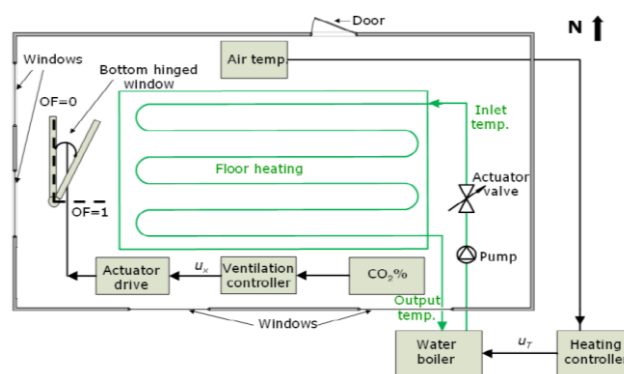


Figura 12 - Representação esquemática do controlo feito na sala teste [38]

Os tipos de controlo utilizados foram, controlo manual, onde se abria a janela manualmente por um período de aproximadamente 5 minutos durante dois intervalos diferentes. Num primeiro cenário este período foi de 1 hora, já num segundo cenário foi de 2 horas. Estipulou-se também um terceiro cenário, onde o controlo feito foi *On/Off*, onde aqui o controlo consistiu em abrir a janela por um período de 1,2 minutos para as janelas que abrem totalmente, ou um período de 4,8 minutos apenas as janelas que abrem apenas 4,4%, quando um determinado set-point de CO₂ fosse atingido. E num quarto e último cenário, estudou-se a aplicação de um controlador PID que regula a percentagem de janelas abertas indo ao encontro do *set-point* de CO₂.

Como resultado da simulação, o autor demonstra que comparando com a estratégia de controlo manual de abertura das janelas, a estratégia de controlo PID através da abertura muito reduzida das janelas, consegue-se facilmente atingir bons níveis de qualidade do ar e reduzir a energia necessária para o aquecimento do espaço a 21°C. Para além disso, a estratégia DCV proposta através da utilização de uma abertura pequena da janela permite flutuações da temperatura interior muito reduzidas, o que maximiza o conforto térmico. Em termos de consumos energéticos, o controlo PID foi o que obteve melhores resultados, conseguindo obter uma redução de 76% em relação ao cenário com controlo manual com abertura intervalada de 1 hora durante 4,8 min. Já o controlo *On/Off* permitiu uma redução de 66% em relação ao mesmo cenário. Comprovando que ambos os controlos DCV conseguem boas reduções do consumo, sendo que aplicando um controlo PID, se conseguem otimizar ainda mais as prestações do controlo DCV na ventilação natural.

2.3. Combinação de Estratégias de Controlo da Ventilação

As formas de controlo apresentadas anteriormente foram analisadas independentemente, sendo que Weimin Wang *et al.* estudaram o resultado da combinação de diferentes estratégias de controlo [31] [39], onde analisou o impacto da combinação de quatro estratégias diferentes de controlo da ventilação, em 4 tipos de edifícios, em 16 locais diferentes, para 22 combinações de controlo. As simulações foram desenvolvidas no *software energyplus*, o que resultou num total de 1408 estudos diferentes. As estratégias de controlo incluem, controlo com economizador, aplicação de sistemas VAV, controlo DCV, e variação da potência de arrefecimento. As estratégias de controlo foram comparadas com um caso base, onde contem um sistema CAV, e foi dimensionado um caudal de ar novo por ocupante. Os quatro tipos de edifícios analisados consistem, num edifício tipo de escritório, um centro comercial, um edifício

com lojas independentes e um supermercado. Os climas utilizados estão caracterizados na Tabela 6, sendo importante uma vez que consoante o tipo de clima variam as reduções de consumo. O gráfico da Figura 13 mostra o perfil de ocupação utilizado para cada tipologia de edifício.

Tabela 6 – Dados climáticos das localizações simuladas [31]

Zona Climática	Tipo de clima	Região	Graus Dia
1A	Muito quente, húmido	Miami	5000<GD _{arref} 10°C
2A	Quente, húmido	Houston	3500<GD _{arref} 10°C<5000
2B	Quente, seco	Phoenix	3500< GD _{arref} 10°C<5000
3A	Ameno, húmido	Atlanta	2500< GD _{arref} 10°C<3500
3B	Ameno, costeiro	Los Angeles	2500< GD _{arref} 10°C<3500
3B	Ameno Seco	Las Vegas	2500< GD _{arref} 10°C<3500
3C	Ameno, marítimo	San Francisco	GD _{aquec} 18°C<2000
4A	Misto, húmido	Baltimore	GD _{arref} 10°C<2500 GD _{aquec} 18°C<300
4B	Misto, seco	Albuquerque	GD _{arref} 10°C<2500 GD _{aquec} 18°C<300
4C	Misto, marítimo	Seattle	2000<GD _{aquec} 18°C<3000
5A	Frio, marítimo	Chicago	3000<GD _{aquec} 18°C<4000
5B	Frio, seco	Denver	3000<GD _{aquec} 18°C<4000
6A	Frio, húmido	Minneapolis	4000<GD _{aquec} 18°C<5000
6B	Frio, seco	Helena	4000<GD _{aquec} 18°C<5000
7	Muito frio	Duluth	5000<GD _{aquec} 18°C<7000
8	Subártico	Fairbanks	7000< GD _{aquec} 18°C

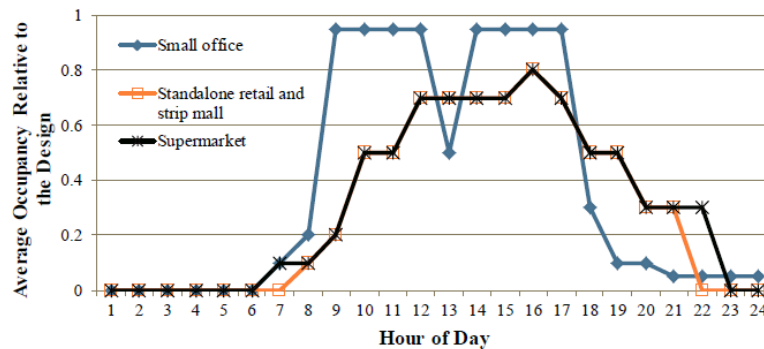


Figura 13 – Ocupação típica semanal para os 4 tipos de edifícios simulados [39]

Como resultado da análise de consumo da aplicação das estratégias aplicadas independentemente, como também da combinação delas, Wang, concluiu o seguinte:

- O uso de economizador potencialmente tem maiores poupanças energéticas em climas amenos e secos, onde as poupanças variam dependendo do tipo de edifício, sendo que em edifícios de escritório os resultados são melhores;
- Implementar um economizador depois de implementado um sistema VAV, não tem grande impacto nas poupanças energéticas dos sistemas AVAC, com exceção de alguns casos, como no caso de um escritório em Los Angeles. Isto porque enquanto se está a utilizar economizador o ventilador funciona a 75% da sua capacidade enquanto que se estiver em funcionamento normal ele pode ir para 40%, e isto pode levar ao aumento do consumo energético por parte do ventilador.
- O uso de sistemas VAV leva a uma redução média de 15% em Miami e Los Angeles, representativos de climas quentes-húmidos e amenos-secos. No entanto este controlo levou a um aumento do consumo energético em Chicago e Duluth, que são representativos de climas frios.
- O impacto de sistemas VAV nos consumos energéticos variam de acordo com o tipo de edifício. Em Miami, um supermercado obteve a maior percentagem de redução de consumos (27%) enquanto que outros tipos de edifício obtiveram reduções entre 15% e 20%.
- Alterar a potência de arrefecimento permite uma redução de 9% em climas quentes, principalmente devido à redução de consumos de arrefecimento.
- Os sistemas VAV e o controlo DCV são as duas estratégias com maior impacto na redução dos consumos energéticos. Onde os sistemas VAV obtêm melhores consumos em climas quentes e a estratégia DCV em climas frios.
- A estratégia DCV contribui com uma redução do consumo média de 10% em todos os casos com exceção de edifício tipo de escritório em Miami e Los Angeles. Sendo que a maior redução (35%) ocorre em Seattle para um centro comercial e edifício com lojas independentes. Sendo que a estratégia DCV é mais eficaz em climas com necessidades de aquecimento.

- A estratégia DCV atinge menores resultados de poupanças energéticas em edifícios tipo de escritórios em comparação com as restantes tipologias. Esta diferença deve-se ao facto de os perfis de ocupação variarem para cada tipologia. Os edifícios tipos de escritórios, têm o horário de ocupação mais constante e com rácios mais elevados em relação aos restantes edifícios, o que vai limitar o potencial de poupança energética da estratégia DCV, uma vez que o caudal insuflado na estratégia base vai ser mais aproximado da estratégia DCV.
- Analisando o desempenho da estratégia DCV em relação ao clima, consegue-se concluir que em climas amenos o DCV é menos eficaz por duas razões distintas. A primeira é que a temperatura exterior nestes climas é mais aproximada da temperatura do ar extraído, e ao se utilizar um caudal de ar novo superior ao que realmente é necessário tem menos impacto nos consumos energéticos do que em climas com maiores discrepâncias de temperaturas. A segunda razão, é que o uso da estratégia DCV sem controlo com economizador reduz o caudal de ar novo, o que pode aumentar os consumos quando é necessário arrefecimento e as condições exteriores são favoráveis para utilização de *free-cooling*, o que normalmente acontece em climas amenos.
- Acrescentar um controlo DCV e VAV a um sistema que já contenha um economizador implementado, o que acontece em muitos casos reais, permite obter reduções interessantes. Sendo que em há maiores poupanças em climas quentes e húmidos do que em climas frios e secos. Onde o potencial de poupança em termos médios é de 28% para escritórios, 32% para centros comerciais, 32% em edifícios com lojas independentes e 22% para supermercados. Este cenário está representado no gráfico da Figura 14.

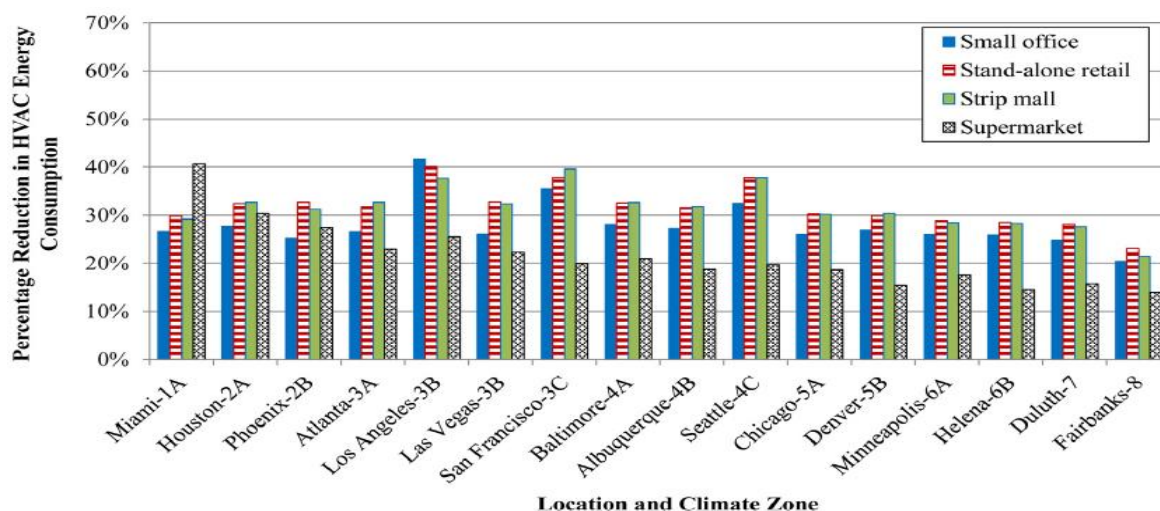


Figura 14 – Consumo energético dos sistemas AVAC, adicionando um controlo VAV e DCV a um sistemas CAV com economizador [31]

Weimin Wang *et al.*, também fez um outro estudo paramétrico [40], onde comparou três estratégias de controlo da ventilação, sistemas VAV, controlo DCV e economizador, em duas tipologias de edifícios em 11 climas diferentes. As conclusões deste estudo, são idênticas ao estudo anterior, onde concluiu que a estratégia DCV é altamente eficaz, especialmente para centros comerciais, atingindo poupanças na ordem dos 10% a 28%, já para edifícios de escritórios pode atingir 11%. Combinar o sistema VAV com DCV permite poupanças entre 35% e os 47% consoante a zona climática para centros comerciais e 20% a 57% em edifícios de escritórios. Sendo que integrar um economizador em sistemas que já tenham implementado controlo VAV e DCV não trás grandes vantagens aumentando as poupanças energéticas entre 0% a 6,6% dependendo do tipo e zona climática do edifício.

Os gráficos da Figura 15 e Figura 16 mostram a variação da poupança energética das diferentes combinações de estratégias de ventilação consoante a zona climática, onde os círculos representam a média das poupanças. É possível também observar que a estratégia DCV em edifícios de escritórios não trás as poupanças muito relevantes, isto deve-se ao facto de neste tipo de edifícios a ocupação ser muito constante e próxima do valor máximo para o qual foi dimensionado o ar novo, limitando assim o potencial de poupança desta estratégia.

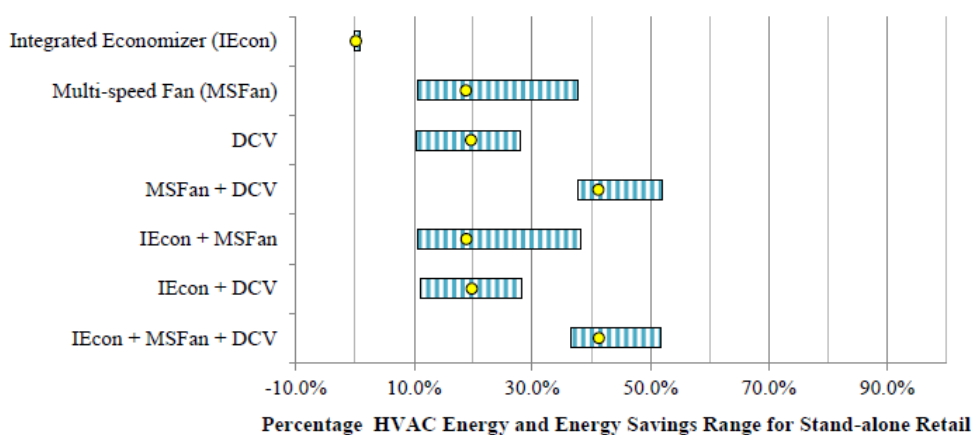


Figura 15 - Percentagem de redução de consumos em função da estratégia de controlo para um edifício comercial [40]

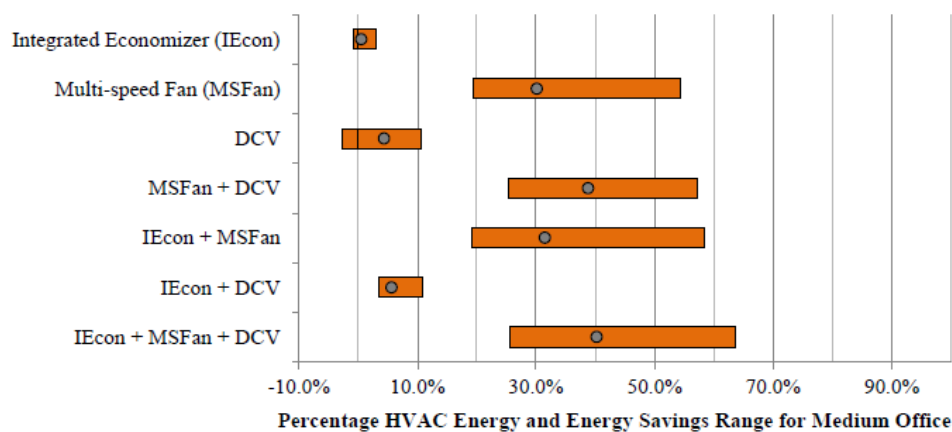


Figura 16 - Percentagem de redução de consumos em função da estratégia de controlo para um edifício tipo escritório [40]

3. Simulação computacional de estratégias DCV

3.1. *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* surgiu a partir do *BLAST* (*Buildding Loads and System Thermodynamics*). Os quais foram desenvolvidos e lançados nos finais dos anos 70, inícios dos anos 80 como ferramentas de simulação energética e cargas térmicas. O seu público-alvo eram os engenheiros e arquitetos que quisessem dimensionar equipamentos AVAC, desenvolver estudos económicos, e otimizar a performance energética. Estes programas foram impulsionados pela crise energética dos anos 70 e pelo reconhecimento de que os consumos energéticos em edifícios eram uma parcela importante no *mix* energético Americano. Tal como os seus progenitores, o *EnergyPlus* é um programa de análises energéticas de simulação e cargas térmicas. Onde permite saber os consumos por parte dos sistemas implementados de forma a manterem as condições de conforto pretendidas dentro de um determinado edifício introduzido pelo utilizador. [41]

O *EnergyPlus* é um programa de simulação energética recente escrito em linguagem *Fortran 90*, com um código modular e estruturado que é fácil de atualizar e expandir. Os benefícios da utilização do *EnergyPlus* incluem [42]:

- As limitações inerentes aos programas *BLAST* e *DOE-2*, tais como, número de zonas, horários, ou sistemas) são eliminadas devido à nova estrutura do *EnergyPlus*, onde podem ser apenas limitados devido aos recursos computacionais do utilizador;
- O código fonte do *EnergyPlus* é aberto para inspeções e compreensão do mesmo;
- É possível criar e acrescentar módulos a aplicar no *EnergyPlus*;
- Os novos módulos desenvolvidos podem ir ao encontro de novas tecnologias aplicadas em edifícios;
- As capacidades de simulação permitem combinar balaços de massa e calor, troca de fluxos de ar entre zonas e sistemas AVAC.

3.2. Estratégias DCV no *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* é capaz de fazer a modelação da estratégia DCV baseada na concentração de CO₂ através de três estratégias diferentes:

- *Ventilation Rate Procedure (VRP)*
- *Indoor Air Quality Procedure (IAQP)*
- *Proportional Control (PC)*

3.2.1. VRP – *Ventilation Rate Procedure*

O método *Ventilation Rate Procedure (VRP)*, definido no *ASHRAE 62.1-2007/2010* calcula as necessidades de ar novo a introduzir na zona controlada baseando-se em dois componentes, o número de ocupantes e a área do pavimento de cada zona. É então necessário definir um caudal mínimo de ar novo por ocupante e por espaço para este método. Sendo que o programa calcula um caudal de ar novo de uma forma dinâmica de acordo com a variação da ocupação.

Para definir o VRP no *EnergyPlus* é necessário introduzir os seguintes inputs no programa:

- ***AirLoopHVAC:OutdoorAirSystem*** para simular a zona de mistura do ar na Unidade de Tratamento de Ar;
- ***Controller:MechanicalVentilation*** com o campo DCV definido como 'Yes' de forma a determinar o caudal de ar novo mínimo a introduzir na zona de mistura;
- ***Controller:OutdoorAir*** para controlar o caudal de ar novo introduzido na zona de mistura;
- ***DesignSpecification:OutdoorAir*** para descrever as necessidades de ar novo para cada zona;
- ***DesignSpecification:ZoneAirDistribution*** para descrever a eficácia de distribuição do ar para cada zona.

A estratégia VRP necessita que sejam determinados caudais de ventilação baseados na área do pavimento e na ocupação da zona controlada. De forma a utilizar os valores de ocupação durante toda a simulação é necessário que o objeto DCV esteja definido como *Yes*, e assim controlar dinamicamente o caudal de ar novo a insuflar na zona condicionada, sendo este controlo feito no *Controller:MechanicaVentilation*.

A forma de cálculo feita pelo *EnergyPlus* é feita de acordo com o *ASHRAE Standard 62.1-2007*, sendo que esta é feita da seguinte forma:

Cálculo do caudal de ar novo mínimo

Para cada Zona, é calculado um primeiro caudal de acordo com a expressão:

$$V_{bz,i} = R_{p,i} \times P_i + R_{a,i} \times A_i \quad (13)$$

Onde:

- $V_{bz,i}$ – caudal de ar necessário na zona ocupada, [m³/s]
- $R_{p,i}$ – caudal de ar novo por ocupante, [m³/s-pessoa]
- P_i – número de ocupantes na zona de controlo
- $R_{a,i}$ – caudal de ar por área do pavimento, [m³/s- m²]
- A_i – área do pavimento, [m²]
- i – índice da zona de controlo

De seguida é contabilizado a eficácia de distribuição do ar, e calculado o caudal de ar efetivo:

$$V_{oz,i} = V_{bz,i} / E_i \quad (14)$$

Onde:

- $V_{oz,i}$ – caudal de ar efetivo na zona ocupada, [m³/s]
- E_i – Efetividade de distribuição do ar

Onde o valor de E_i , é definido de acordo com a Tabela 7, retirado do *ASHRAE Standard 62.1-2010*, e só então é calculado um caudal de ar novo mínimo a introduzir pelo sistema.

Tabela 7 – Eficácia de distribuição do ar [44]

Configuração de distribuição do ar	E_z
Insuflação de ar frio pelo teto	1,0
Insuflação de ar quente pelo teto e extração pelo piso	1,0
Fornecimento de ar quente, 8°C acima da temperatura do espaço, e extração pelo teto, insuflado a 0,8 m/s, atingindo os 1,4 m a partir do piso. Nota: Para velocidades mais baixas, $E_z=1,8$	1,0
Insuflação de ar frio junto ao piso e retorno pelo teto, insuflado a 0,8 m/s, atingindo os 1,4m a partir do piso. Nota: A maioria dos sistemas de distribuição de ar deste tipo cumprem esta condição	1,0
Insuflação de ar frio pelo piso e retorno pelo teto, a baixa velocidade com distribuição unidirecional e estratificação térmica	1,2
Insuflação e extração de ar quente junto ao piso	1,0
Insuflação e extração de ar quente pelo teto	1,0
Unidade terminal no lado oposto das condutas de insuflação e/ou extração	0,8
Unidade terminal perto das condutas de insuflação e/ou extração	0,5

Para sistemas que fornecem uma única zona, o caudal de ar novo é dado por:

$$V_{ot} = V_{oz} \quad (15)$$

Para sistemas de 100% de ar novo que servem mais do que uma zona, o caudal de ar novo é dado por:

$$V_{ot} = \sum_{i=1}^{todas\ as\ zonas} V_{oz,i} \quad (16)$$

Para sistemas que utilizam ar misturado, e que servem mais de que uma zona, o caudal de ar novo é dado por:

$$V_{ot} = V_{ou}/E_v \quad (17)$$

Onde:

$$V_{ot} = \sum_{i=1}^{todas\ as\ zonas} (R_{p,i} \times P_i) + \sum_{i=1}^{todas\ as\ zonas} (R_{a,i} \times A_i) \quad (18)$$

X_s – Fração de ar exterior incorrigido

V_{ps} – Caudal de ar insuflado pelo Sistema, [m³/s]

$$X_s = V_{ou}/V_{ps} \quad (19)$$

$$Z_{d,i} = V_{oz,i}/V_{dz,i} \quad (20)$$

$Z_{d,i}$ – fração de ar novo insuflado na zona

$V_{dz,i}$ – caudal de ar fornecido à zona

E_v – eficiência do Sistema de ventilação

O programa então calcula a fração de o caudal de ar novo mínimo baseado na informação fornecida pelo objeto *Controller:MechanicalVentilation* e o valor máximo de caudal de ar, da seguinte forma:

$$MechVentOutsideAirMinFrac = V_{ot}RhoStd / \dot{m}_{max\ branch}$$

MechVentOutsideAirMinFrac = fração de ar novo mínimo baseada no objeto *Controller:MechanicalVentilation* especificado para todas as zonas

O objeto *Controller:OutdoorAir* controla o caudal de ar novo necessário a introduzir pela caixa de mistura baseado em vários *inputs* definidos pelo utilizador. O utilizador pode definir uma percentagem mínima de caudal de ar novo introduzida pelo sistema ou um valor fixo mínimo. Sendo que o controlo DCV é feito pelo objeto *Controller:MechanicalVentilation* em conjunto com o *Controller:OutdoorAir*, sendo possível ainda acrescentar um controlo com economizador. O *EnergyPlus* utiliza o valor máximo de caudal de ar novo mínimo dado por estes métodos.

3.2.2. IAQP - Indoor Air Quality Procedure

A estratégia IAQP é um processo que faz variar o caudal de ar novo baseando-se na análise de concentração de contaminantes e *set-points* dos mesmos. Apesar do dióxido de carbono não ser considerado como contaminante, este serve como indicador da qualidade do ar interior em edifícios, o *EnergyPlus* utiliza este método para manter a concentração de CO₂ abaixo de um determinado *set-point* de forma a manter boa qualidade do ar interior.

Sendo que o sistema, através dos valores de concentração do CO₂ do ar exterior e do ar no interior do edifício, insufla um caudal de ar novo de forma a ir de encontro ao *set-point* de concentração pretendido.

Da mesma forma que no VRP, o utilizador deve introduzir estes três objetos de forma a fazer o controlo DCV baseado no CO₂ com o IAQP:

- *AirLoopHVAC:OutdoorAirSystem* para simular a zona de mistura do ar na Unidade de Tratamento de Ar;
- *Controller:MechanicalVentilation* com o campo DCV definido como 'Yes' de forma a determinar o caudal de ar novo mínimo a introduzir na zona de mistura;
- *Controller:OutdoorAir* para controlar o caudal de ar novo introduzido na zona de mistura.

Onde o caudal de ar novo fornecido pela unidade de tratamento de ar é calculado através da soma do caudal de ar novo necessário par as diferentes zonas servidas pelos sistemas de ar condicionado.

$$\dot{m}_{OA} = \sum_i^N \dot{m}_{OA,z,i} \quad (21)$$

Onde:

$\dot{m}_{OA,z,i}$ = Caudal de ar exterior calculado para o total de zonas

N = Número de zonas controlado pelo sistema AVAC

Onde este caudal é obtido através da equação de balanço mássico descrita abaixo:

$$\rho_{ar} V_z C_{CO2} \frac{dC_z^t}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} Kg_{co2gerado} \times 1.0^6 + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i (C_{zi} - C_z^t) + \dot{m}_{inf} (C_{\infty} - C_z^t) + \dot{m}_{sis} (C_{sup} - C_z^t) \quad (22)$$

Em que:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{N_{sl}} Kg_{CO2gerado} &- \text{Somatório do CO}_2 \text{ gerado internamente, [Kg/s]} \\ \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i (C_{zi} - C_z^t) &- \text{Ganho de dióxido de carbono devido a trocas de ar entre zonas, [ppm-Kg/s]} \\ \rho_{ar} V_z C_{CO2} \frac{dC_z^t}{dt} &- \text{Concentração de dióxido de carbono armazenada na zona, [Kg/s]} \\ \dot{m}_{sis} (C_{sup} - C_z^t) &- \text{Dióxido de carbono transferido pelo sistema de AVAC [ppm-Kg/s]} \\ \dot{m}_{inf} (C_{\infty} - C_z^t) &- \text{Dióxido de carbono transferido devido a infiltrações de ar exterior, [ppm-Kg/s]} \end{aligned}$$

C_{zi}	Concentração de dióxido de carbono do ar transferido de outra zona para a zona de controlo, [ppm]
C_{∞}	Concentração de dióxido de carbono do ar exterior [ppm]
C_{sup}	Dióxido de carbono do caudal de ar fornecido pelo sistema AVAC [ppm]
\dot{m}_{sis}	Caudal de ar fornecido pelo Sistema AVAC, [Kg/s]
C_z^t	Concentração de dióxido de carbono em cada instante, [ppm]
ρ_{ar}	Densidade do ar, [Kg/m ³]
V_z	Volume da zona, [m ³]
C_{CO2}	Coefficiente de armazenamento do CO ₂ no espaço

3.2.3. PC - Proportional Control

O controlo do caudal de ventilação pode ser ajustado proporcionalmente de acordo com os níveis de CO₂. Para este tipo de controlo são estabelecidos dois *set-points*, um *set-point* mínimo e um *set-point* pretendido da concentração de CO₂. Sendo que à medida que a concentração de CO₂ no espaço controlado se vai afastando do *set-point* mínimo, a taxa de ar novo vai aumentar proporcionalmente até um máximo definido para o *set-point* máximo da concentração de CO₂ pretendida.

Tal como o *Ventilation Rate procedure* e o *Indoor Air Quality Procedure*, este método de controlo também necessita que sejam introduzidos os seguintes três objetos para o controlo ser possível:

- *AirLoopHVAC:OutdoorAirSystem* para simular a zona de mistura do ar na Unidade de Tratamento de Ar;
- *Controller:MechanicalVentilation* com o campo DCV definido como 'Yes' de forma a determinar o caudal de ar novo mínimo a introduzir na zona de mistura;
- *Controller:OutdoorAir* para controlar o caudal de ar novo introduzido na zona de mistura.

Para cada zona, o caudal de ar nome fornecido pela unidade de tratamento de ar é calculado da seguinte forma:

O caudal de ar novo insuflado por pessoa, $P_{z,i}$

$$V_{ot-dim,i} = \frac{(R_{p,i} \cdot P_i) + (R_{a,i} \cdot A_i)}{E_i} \quad (23)$$

O caudal de ar novo necessário quando a zona está desocupada isto é, $P_{z,i}=0$

$$V_{ot-min,i} = \frac{(R_{a,i} \cdot A_{z,i})}{E_i} \quad (24)$$

O set-point da concentração de CO₂ do $V_{ot-dim,i}$

$$C_{s-dim,i} = C_{\infty} + \frac{G_{CO_2}}{(V_{ot-dim,i}/P_i)} \quad (25)$$

O *set-point* de CO₂ mínimo deve ser introduzido pelo utilizador no objeto *ZoneControl:ContaminatController* ou então este é definido como sendo a concentração do ar exterior.

$$C_{s-min,i} = C_{\infty} \quad (26)$$

Quando a concentração de CO₂ é igual ao mínimo definido, o caudal de ar novo vai para o mínimo dimensionado, sendo que quando a concentração de CO₂ atinge o valor máximo, o caudal de ar novo vai para o máximo. E quando a concentração de CO₂ se encontra entre os dois pontos, o caudal de ar novo é modelado proporcionalmente da seguinte forma:

$$V_{ot,i} = V_{ot-min,i} + (V_{ot-dim,i} - V_{ot-min,i}) \frac{(C_{s-atual,i} - C_{s-min,i})}{(C_{s-dim,i} - C_{s-min,i})} \quad (27)$$

$R_{p,i}$ – Caudal de ar necessário por pessoa, [m³/s-pessoa]

$R_{a,i}$ – Caudal de ar necessário por unidade de área, [m³/s-m²]

P_i – Número de ocupantes

A_i – Área do pavimento, [m²]

E_i – Eficácia de distribuição do ar

G_{CO_2} – Taxa de geração de CO₂, [m³/s-pessoa]

C_{∞} – concentração de dióxido de carbono exterior, [ppm]

$C_{s-dim,i}$ – Concentração de CO₂ no espaço para as condições dimensionadas, [ppm]

$C_{s-min,i}$ – Concentração de CO₂ mínima, [ppm]

$C_{s-atual,i}$ – Concentração de CO₂ existente no espaço, [ppm]

$V_{ot-dim,i}$ – Caudal de ar novo necessário para para $C_{s-dim,i}$, [m³/s]

$V_{ot-min,i}$ – Caudal de ar novo mínimo para a condição de $C_{s-min,i}$, [m³/s]

$V_{ot,i}$ – Caudal de ar novo insuflado para a condição de $C_{s-atual,i}$, [[m³/s]

A concentração de dióxido de carbono mínima é definida no objeto *ZoneControl:ContaminantController* na forma de um horário. Se esse horário não for definido, o valor de concentração de dióxido de carbono do ar exterior vai ser usado como mínimo. De forma a que o método *Proportional Control* seja ativado, é necessário cumprir as seguintes condições, caso contrario o que o programa faz é aplicar a estratégia de *Ventilation Rate Procedure*.

- O campo “*Carbon Dioxide Control Availability Schedule Name*” no objeto *ZoneControl:ContaminantController* deve ser maior que zero.
- O CO₂ produzido pela ocupação deve ser maior que zero.
- OS campos “*Outdoor air flow per person*” e “*Outdoor air flow per zone floor area*” no objeto “*DesignSpecificaton:OutdoorAir*” deve ser maior que zero.

3.2.4. Outputs Possíveis

Depois de definida uma formar de controlo e introduzidos todos os inputs descritos acima referente às diferentes estratégias DCV, é necessário criar outputs de forma a conseguir observar o efeito que o controlo teve tanto ao nível das concentrações de CO₂, como da variação do caudal de ar novo. Sendo assim devem ser introduzidos os outputs definidos abaixo:

- *Zone CO2 Air Concentration* – permite observar a variação da concentração de CO₂ ao longo do tempo;
- *Zone Air CO₂ Setpoint Concentration* – permite observar o *set-point* de CO₂ definido ao longo do tempo;
- *Zone Air CO₂ Internal Gain Volume Flow Rate* – permite observar o ganho de CO₂ no espaço, por exemplo pela ocupação;
- *Air System Outdoor Air Mass Flow Rate* – permite observar o caudal de a taxa de ar novo insuflada no espaço.

3.3. Análise Crítica ao Controlo DCV no EnergyPlus

Os controlos simulados pelo *EnergyPlus* servem para se adequar à realidade encontrada nos sistemas AVAC. Sendo que o controlo VRP adapta-se a casos onde se pretenda simular um espaço cuja ocupação seja previsível, por exemplo, num escritório, em salas de aula, ou então num edifício que tenha implementado um método de medição direta do número de ocupantes. O método IAQP simula um controlo por *set-point*, onde o ar novo é controlado por sensores de CO₂, sendo que o ar insuflado é feito de forma a ir ao encontro de um *set-point* estabelecido. O ultimo método referido, *proportional control*, também é feito através do uso de sensores de CO₂ sendo o caudal de ar novo modelado através do uso de um controlador que lê os sinais do sensor de CO₂. Os gráficos abaixo mostram a forma como o ar novo é controlado pelas diferentes estratégias de acordo com os níveis de CO₂ e da ocupação. O gráfico da Figura 17, mostra o funcionamento de um sistema CAV em relação à evolução dos níveis de CO₂ (linha a azul), de acordo o ar novo insuflado (linha a amarelo), e a ocupação existente (linha a verde). Como se pode ver, o sistema AVAC insufla ar a um caudal constante, num horário de funcionamento estabelecido de forma a diluir o CO₂ libertado pelos ocupantes. Sendo que este caudal deve ser o suficiente para diluir o dióxido de carbono libertado pela ocupação máxima. Já o gráfico da Figura 18 mostra a utilização do controlo VRP, e como se observa, o caudal de ar novo (linha a amarelo), acompanha a evolução da ocupação, mantendo os níveis de CO₂ abaixo do *set-point* (linha a vermelho). No método IAQP e no método PC, o ar novo é controlado de acordo com os níveis de CO₂, e como é previsível, no método IAQP, os níveis de CO₂ encontram-se sempre próximo do *set-point*, uma vez que o ar insuflado é calculado de forma a ir ao encontro do *set-point*, já no PC, os níveis de CO₂ encontram-se sempre abaixo do *set-point*, uma vez que o registo de ar novo, vai abrindo modelarmente desde o *set-point* mínimo até ao *set-point* máximo, o que faz com que se acabe por insuflar uma maior quantidade de ar novo em relação ao IAQP. A vantagem deste método é em relação a grandes alterações da ocupação, uma vez que nestes casos o que pode acontecer é que no IAQP, se atinjam níveis de concentração de CO₂ superiores ao *set-point*, enquanto que no PC, é mais fácil de controlar essas variações rápidas e manter os níveis de concentração do CO₂ dentro dos limites estabelecidos.

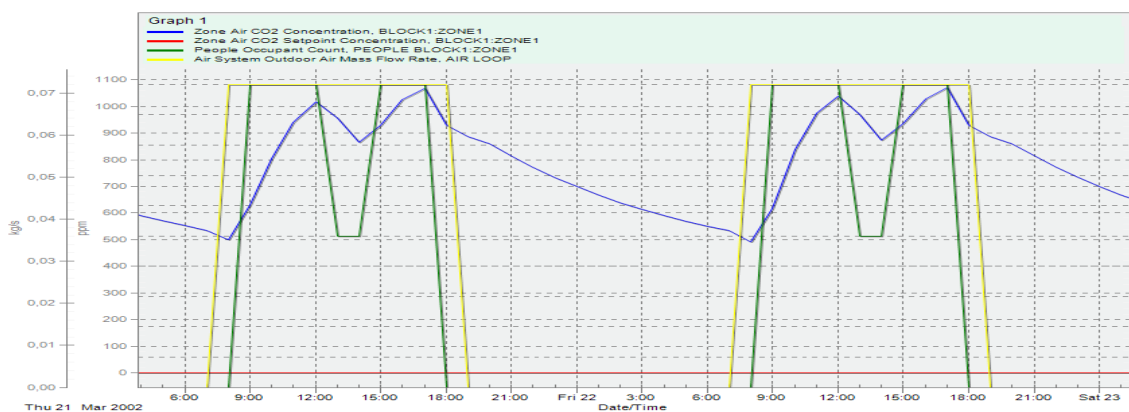


Figura 17 - Representação do funcionamento de um Sistema CAV

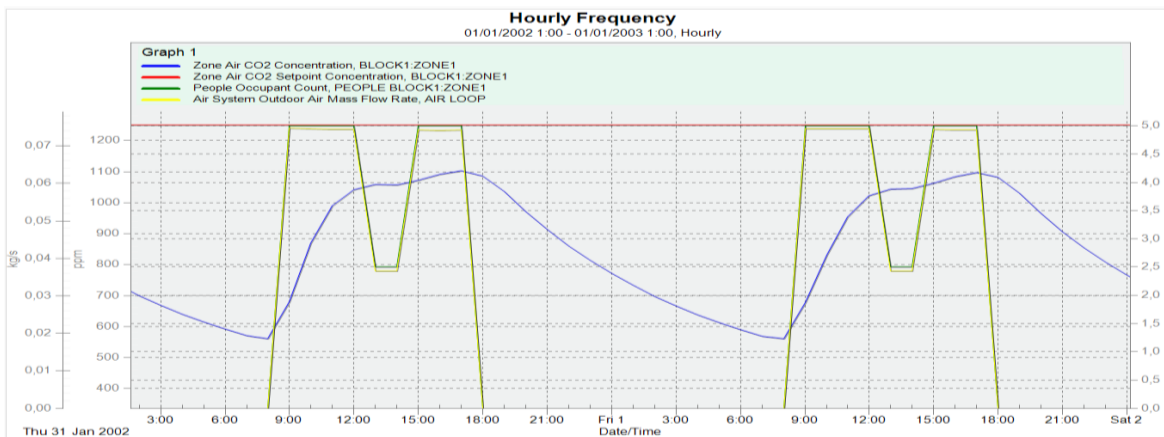


Figura 18 - Representação do controlo VRP

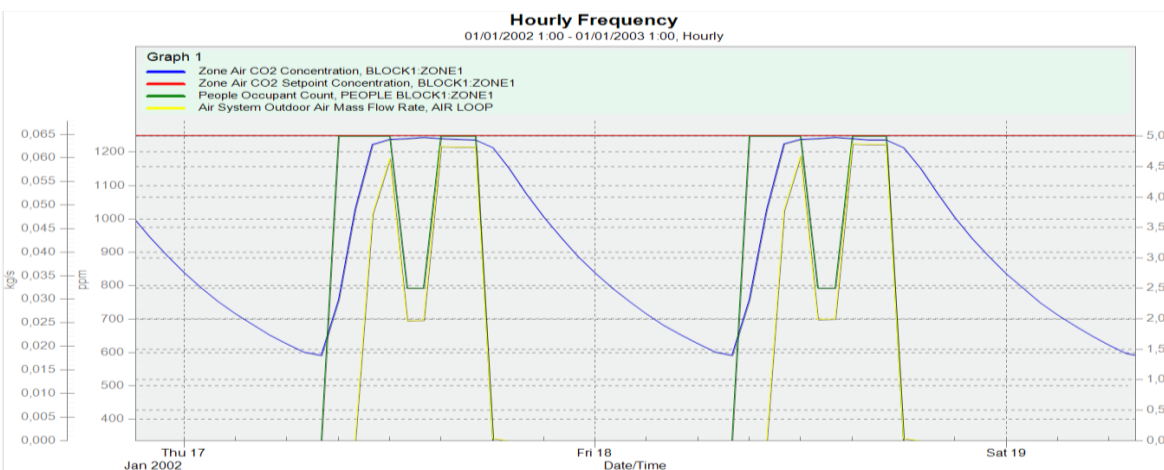


Figura 19 - Representação do controlo IAQP

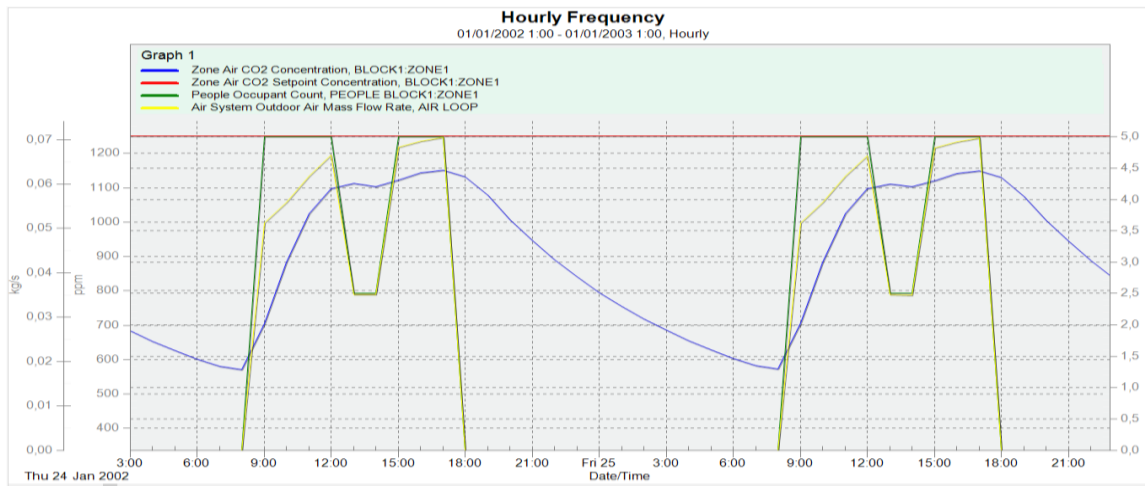


Figura 20 – Representação do controlo PC

Analisando os métodos acima descrito, pode-se afirmar que estes podem simular várias estratégias que são atualmente utilizadas nos sistemas AVAC em termos reais através de um controlador. Já varias formas de controlo DCV foram descritas neste documento no capítulo 2, sendo que uma das formas de controlo dentro da estratégia DCV não se encontra ainda disponível no *EnergyPlus*, que é a implementação de um controlo PID. Este tipo de controlo poderia no futuro vir a ser integrado no *EnergyPlus*, uma vez que Nassif [32], já demonstrou que este tipo de controlo tem melhor desempenho em termos energéticos, sendo este tipo de controlo facilmente implementado em casos reais. Outra forma de controlo que não é possível no *EnergyPlus*, é a utilização de um controlo *ON/OFF* do sistema de ventilação de acordo com os níveis de CO₂.

4. Potencial do DCV na promoção da eficiência energética

Neste capítulo pretende-se avaliar o potencial da estratégia DCV na redução do consumo energético de edifícios recorrendo a ferramentas computacionais de tipo holístico (simulação dinâmica do desempenho energético de edifícios), neste caso o *EnergyPlus*. Pretende-se fazer uma análise a uma célula de teste genérica, avaliando o efeito de variáveis determinantes no impacto da estratégia DCV nos consumos energéticos, como a ocupação e o clima. Onde se pretende fazer uma análise de resultados comparando o consumo energético específico conseguido com diferentes controlos DCV no *EnergyPlus*.

Para isso vai ser simulada um célula de teste em 3 climas diferentes do território Português, com dois horários de ocupação diferentes, onde se vão aplicar os três tipos de controlo DCV possíveis de simular no *EnergyPlus*, de forma a comparar o seu desempenho com um cenário base, onde o caudal de ar novo vai ser dimensionado de acordo com o novo regulamento Português.

De forma a avaliar o desempenho do *EnergyPlus* comparativamente com a Portaria Técnica ainda provisória do novo SCE, transposto pelo Decreto Lei Nº118/2013, que respeita ao cálculo do caudal mínimo de ar novo. Vai-se analisar qual o caudal de ar novo necessário para manter a concentração de CO₂ num determinado caso de estudo e comparar com os resultados do *EnergyPlus*. E assim analisar comparativamente o potencial da estratégia DCV em relação ao proposto pela nova legislação, fazendo uma análise crítica aos resultados obtidos.

4.1. Método de Cálculo definido na Portaria Técnica Provisória

O Anexo IV da nova Portaria Técnica apresenta os Requisitos de Ventilação e QAI exigidos. Desta forma são descritos dois métodos de cálculo do caudal mínimo de ar novo, o Método analítico e o Método prescritivo. O método analítico traduz a aplicação da evolução temporal da concentração de dióxido de carbono (CO₂) previsível no espaço, em função do respetivo perfil de ocupação, perfil de ventilação e das características físicas dos ocupantes. Já o método prescritivo baseia-se na determinação dos caudais de ar novo que garantem a diluição da carga poluente devido, aos ocupantes do espaço e em função do tipo de atividade que nele

desenvolvem, como também ao próprio edifício, devido aos tipos de materiais usados na sua construção e revestimentos de superfícies e mobiliários.

4.1.1. Método Analítico

No método analítico, o caudal mínimo e ar novo é determinado através de um processo de cálculo da concentração média de CO₂ durante o período de ocupação, no qual o valor do caudal de ar novo (Q_{AN}) é ajustado até ser assegurado que não é excedido o limiar de proteção para a concentração de CO₂.

Dessa forma, utiliza-se a seguinte expressão para determinar a evolução temporal da concentração de CO₂ em ambientes interiores:

$$C_{int}(t_i) = C_{\infty} + \frac{G_{CO_2}}{Q_{AN}} + \left(C_{int}(t_{i-1}) - C_{\infty} - \frac{G_{CO_2}}{Q_{AN}} \right) \cdot e^{-\frac{G_{CO_2}}{V_z} \cdot (t_i - t_{i-1})} \quad \begin{matrix} [\text{mg}/\text{m}^3] \\ \text{ou} \\ [\text{m}^3/\text{m}^3] \end{matrix} \quad (28)$$

Em que:

- t – Instante genérico, ou instante final de cada incremento de tempo considerado no cálculo numérico, [h]
- $C_{int}(t_i)$ – Concentração de CO₂ no ar interior no instante t, [mg/m³] ou [m³/ m³]
- Q_{AN} – Valor do caudal de ar novo, [m³/h]
- C_{∞} – Concentração do CO₂ no ar exterior, [mg/m³] ou [m³/ m³]
- G_{CO_2} – Taxa de geração de CO₂ no espaço, [mg/h] ou [m³/h]
- V_z – Volume de ar no interior do espaço, [m³]
- $C_{int}(t_{i-1})$ – Valor da concentração de CO₂ no ar interior no instante inicial de cada incremento de tempo considerado no cálculo numérico, [mg/m³] ou [m³/ m³]

Onde o valor da concentração de CO₂ exterior deve corresponder a 684 [mg/m³] (correspondente a 380 [ppm], à pressão atmosférica normal e a 25°C. E o valor da taxa total de geração de CO₂ (G_{CO_2}) é função do nível de atividade metabólica, da corpulência e do número de ocupantes do espaço em causa, sendo calculado de acordo com as seguintes expressões:

$$G_{CO_2} = (17000 \cdot A_{Du} \cdot M) \cdot N \quad [\text{mg/h}] \quad (29)$$

ou

$$G_{CO_2} = (0,0094 \cdot A_{Du} \cdot M) \cdot N \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (30)$$

Em que:

M – Taxa de metabolismo dos ocupantes [met] (1met= 58,15 W/m²)

N – Número de ocupantes do espaço

A_{Du} – Área de DuBois da superfície corporal [m²], dada pela seguinte expressão:

$$A_{Du} = 0,202 \cdot W_b^{0,425} \cdot H_b^{0,725} \quad [\text{m}^2] \quad (31)$$

Em que:

W_b – Massa corporal típica, [kg]

H_b – Altura típica do corpo humano, [m]

Onde os valores característicos da área de Dubois podem ser retirados da tabela seguinte

Tabela 8 – Área de DuBois em função da idade dos ocupantes e parcela a adicionar à atividade metabólica em função da faixa etária

Idade dos Ocupantes	A_{Du} [m ²]	ΔM [met]
3 anos	0,65	0,19
Até 6 anos	0,80	0,14
Até 9 anos	1,10	0,09
Até 11 anos	1,30	0,07
Até 14 anos	1,60	0,05
Até 18 anos e adultos	1,80	0,00

O calor de concentração de CO₂ no interior de um edifício é definido na tabela abaixo consoante a tipologia do mesmo.

Tabela 9 – Limiares de proteção do CO₂ [mg/m³] ou [ppm]

	Limiar de proteção CO ₂	
Tipologias especiais	1600 [mg/m ³]	900 [ppm]
Novos	2250 [mg/m ³]	1250 [ppm]

Para efeito da determinação dos valores de caudal de ar novo pelo presente método, obtida pela expressão 28, durante o período de ocupação, devem ser explicitados os seguintes dados de projeto:

- Dimensões do espaço;
- Número de ocupantes;
- Nível de atividade metabólica e área da superfície corporal;
- Perfil horário de ocupação do espaço, sendo que para efeitos do presente cálculo, um dado período horário só será contabilizável se a ocupação for, pelo menos, de 50%;
- Perfil horário de ventilação do espaço, considerando que a ventilação se encontra permanentemente ligada durante o período de ocupação, independentemente do número de ocupantes presentes.

No caso de projetos de novos edifícios e grandes edificações em que não se disponha dos dados acima referidos, o caudal de ar novo pode ser calculado para as condições em que é atingido o regime permanente de acordo com a expressão 32,

$$Q_{AN} = \frac{G_{CO_2}}{C_{lp} - C_{\infty}} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (32)$$

Q_{AN} – Valor de caudal de ar novo, [m³/h]

G_{CO_2} – Taxa de geração de CO₂, [mg/h] ou [m³/h]

C_{lp} – Limiar de proteção para a concentração de CO₂ no ar interior, [mg/m³] ou [m³/m³]

C_{∞} – Valor de concentração do CO₂ no ar exterior, [mg/m³] ou [m³/m³]

4.1.2. Método prescritivo

O caudal mínimo de ar novo a considerar por aplicação deste método é o maior dos valores determinados para os dois tipos de carga poluente, ocupação e materiais de construção. Os valores de caudal mínimo de ar novo para diluição da carga poluente devida aos ocupantes devem ser os que constam na Tabela 10 para diferentes valores de taxa de metabolismo dos ocupantes. Estes valores resultam de uma simplificação da aplicação do método analítico, tendo, para esse efeito sido consideradas as condições em que é atingido o regime permanente e uma ocupação do espaço constituída por adultos, com uma corpulência média correspondente ao percentil 50 (70 [kg] de peso e 1,70 [m] de altura, para a qual a área da superfície exterior do corpo é de 1,81 [m²]).

Em espaços ocupados por pessoas com mais do que um tipo de atividade, a média ponderada do nível de atividade metabólica (M_{med}) deve ser calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$M_{med} = \frac{\sum_l (N_M \cdot M)}{\sum_l N_M} \quad [\text{met}] \quad (33)$$

onde (N_M) representa o número de pessoas no espaço com cada nível de atividade metabólica (M). Onde o requisito de caudal de ar novo deve ser calculado através da seguinte expressão:

$$Q_{AN} = M_{med} \cdot Q_{AN.1met} \quad [\text{m}^3/\text{h.pessoa}] \quad (34)$$

sendo o valor de $Q_{AN.1met}$ indicado na Tabela 10 para o caudal mínimo de ar novo para o nível de atividade metabólica igual a 1.

Tabela 10 – Caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devido à ocupação [m³/h-pessoa]

Tipo de Atividade	Taxa de Metabolismo dos ocupantes – M[met]	Exemplos de tipo de espaço	Caudal ar novo [m³/h-pessoa]
Sono	0,8	Quartos, Dormitórios e Similares	16
Descanso	1,0	Salas de repouso, Salas de espera, Salas de Conferência, Auditórios e Similares	20

Sedentária	1,2	Escritórios, Gabinetes, Secretarias, Salas de aula, Cinemas, Salas de espetáculo,	24
		Salas de refeições, Lojas, Museus e Galerias	
Moderada	1,75 (1,4 a 2,0)	Salas de Jardim de Infância e Pré-escolar	28
		Laboratórios, Ateliês, Salas de Desenho e trabalho de oficinais, Cafés, Bares,	
Ligeiramente alta	2,5 (2,0 a 3,0)	Salas de jogos e similares	35
		Pistas de dança, Salas em ginásios, Salas de ballet e similares	
Alta	5,0 (3,0 a 9,0)	Salas de Musculação, Salas em ginásios e pavilhões desportivos e similares	98

O valor de caudal mínimo de ar novo do espaço para diluição da carga poluente devida ao próprio edifício, aos seus materiais e às atividades desenvolvidas resulta da aplicação do previsto na Tabela 11.

Tabela 11 – Caudal de ar novo determinado em função da carga poluente devida ao edifício [m³/(hora.m²)]

Situação do Edifício	Caudal de ar novo [m ³ /(hora.m ²)]
Sem atividades que envolvam a emissão de poluentes específicos	3
Com atividades que envolvam a emissão de poluentes específicos	5

4.2. Comparação *EnergyPlus* com a Portaria Técnica no que respeita à evolução temporal da concentração de CO₂

De forma a comparar o desempenho do *EnergyPlus* em relação à evolução temporal dos níveis de CO₂ de acordo com a taxa de ocupação e o caudal de ar novo, fez-se um caso de estudo onde em primeiro lugar, se determina o caudal de ar novo através da nova Portaria Técnica, e em

segundo lugar, utiliza-se esse caudal de ar novo no *EnergyPlus*, aplicado ao estudo de caso, de forma a comparar a evolução dos níveis de CO₂ através da equação (28) e o *EnergyPlus*.

Foi então criado um modelo com as seguintes especificações:

Tabela 12 – Especificações utilizadas no modelo desenvolvido

Variáveis	
Caudal de ar novo [m ³ /s]	0,065 (durante período de ocupação)
Ocupantes [pessoas]	10-(08:00-12:00 & 14:00-18:00) 5-(12:00-14:00)
Taxa Metabólica [met]	1,2
Área de Dubois [m ²]	1,8
Concentração de CO ₂ do ar exterior [ppm]	380
Geração de CO ₂ por ocupante [mg/h-pessoa]	36720
Volume do espaço [m ³]	350

No *EnergyPlus* criou-se um modelo exatamente com as mesmas características, de forma a comparar os resultados obtidos. O gráfico da Figura 21 apresenta a evolução dos valores obtidos, onde é possível comparar a evolução da concentração de CO₂. E como se pode observar, a variação da concentração de CO₂ obtido através de simulação dinâmica com o *EnergyPlus* ou obtido através do método de cálculo estabelecido pelo novo Regulamento Técnico é bastante semelhante. Os valores analisados apresentam um coeficiente de correlação de Pearson de 0,95, sendo este valor indicativo de uma correlação forte. Dessa forma é possível validar a utilização do *EnergyPlus* para cálculo do caudal de ar novo mínimo exigido.

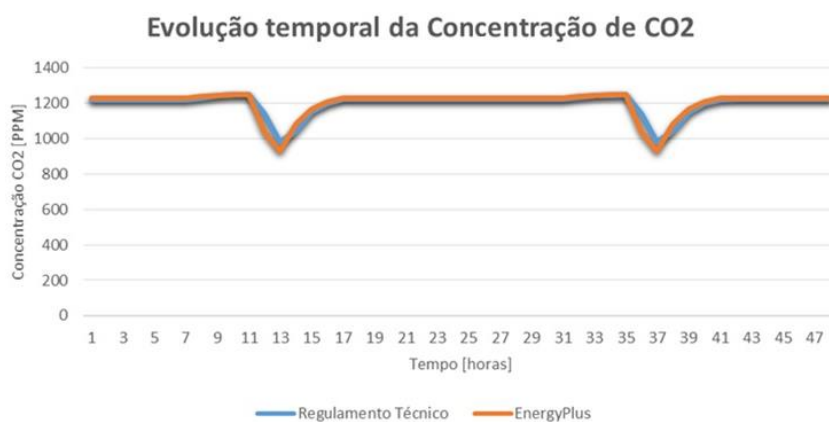


Figura 21 – Variação temporal dos níveis de concentração do CO₂

4.3. Estudo Paramétrico das diferentes estratégias DCV

A célula de teste está representada na Figura 22 – Representação gráfica da célula de teste desenvolvida no software *DesignBuilder*, e depois exportada para *EnergyPlus*, onde se vão introduzir todos os parâmetros necessários para simular a estratégia DCV, uma vez que o *DesignBuilder* ainda não permite a implementação deste controlo.

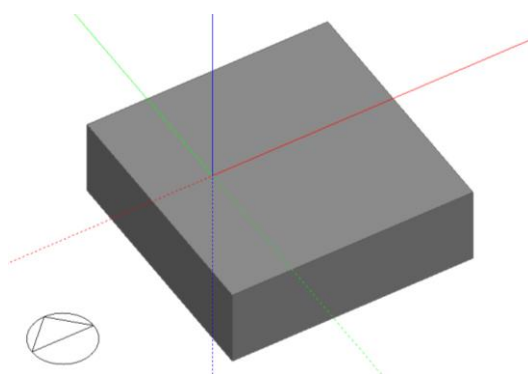


Figura 22 – Representação gráfica da célula de teste

Tabela 13 – Variáveis da célula de teste utilizada

Variáveis	
Sistema AVAC	CAV
Caudal de ar novo [m^3/s -ocupante]	0,0065
Infiltrações [rph]	0,1
Ocupação [pessoas/ m^2]	0,1
Concentração de CO_2 do ar exterior [ppm]	380
Set-Point mínimo de CO_2 [ppm]	600
Set-Point máximo de CO_2 [ppm]	1250
Geração de CO_2 por ocupante [mg/h -pessoa]	36720
Volume do espaço [m^3]	350
Área [m^2]	100

4.3.1. Cenários Simulados

O caso base é dimensionado de acordo com o novo Regulamento Técnico, sendo que o caudal de ar novo é dimensionado pelo método analítico, já descrito na secção 4.1. De forma a analisar a influência que a ocupação e o clima têm no desempenho da estratégia DCV. Simulou-se a célula de teste com dois horários de ocupação diferentes, e horários de funcionamento de sistemas AVAC também diferentes indo ao encontro da ocupação. Foi ainda analisado o comportamento dos diferentes cenários em 3 zonas climáticas do território Português, Bragança, Évora e Porto. Sendo assim, simulou-se uma ocupação típica em edifícios de escritório, onde esta é muito constante, e o outro com uma ocupação típica de um edifício comercial, onde esta é mais inconstante e com grandes variações, onde se estabeleceu também uma taxa metabólica dos ocupantes típica para cada cenário. Os gráficos da figura Figura 23 e Figura 24 mostram os horários de ocupação típicos estabelecidos.

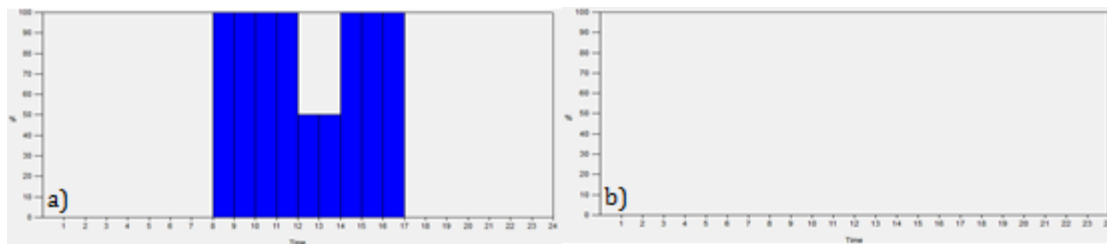


Figura 23 – Horário de Ocupação típica de escritório, a)semana e b)fim-de semana

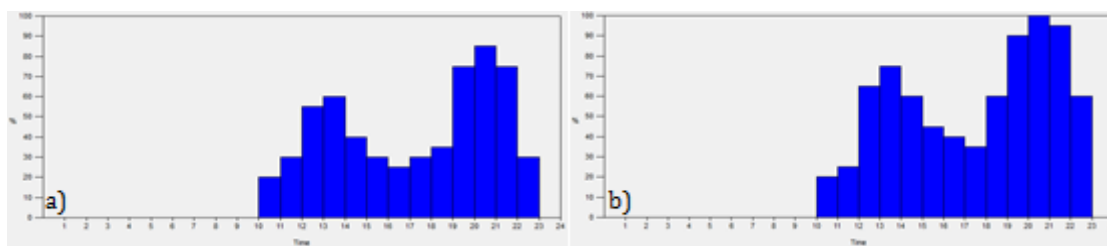


Figura 24 – Horário de Ocupação típica edifício comercial, a)semana e b)fim-de semana

O comportamento das estratégias DCV tem grandes variações dependendo das condições climáticas, sendo que os três climas analisados são bastante diferentes. No mapa representado na Figura 25, encontra-se a localização geográfica dos três locais analisados.

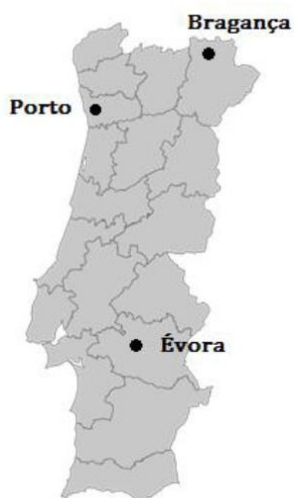


Figura 25 – Mapa de Portugal com indicação das cidades cujos climas são analisados [45]

No gráfico da Figura 26 estão representadas as temperaturas médias mensais para as três cidades. O Porto é uma cidade do litoral norte e o seu clima tem a menor amplitude térmica anual dos três climas contemplados, 9°C entre as temperaturas médias. No Inverno a temperatura nunca desce abaixo dos 0°C e no Verão raramente ultrapassa os 30°C. Bragança é uma cidade do norte que se localiza longe da costa. Tem um clima com elevada amplitude térmica anual, 17°C, os invernos são muito frios, é frequente a temperatura descer abaixo de 0°C. No verão a temperatura não é excessivamente quente. Évora é uma cidade que se localiza mais a sul e longe da costa. Tem um clima com elevada amplitude térmica anual, 14°C mas os invernos não se destacam pelas temperaturas muito baixas. Pelo contrário, no verão as temperaturas são elevadas e o calor é persistente.

Escolheram-se estes três climas, uma vez que assim se estuda o efeito num clima frio, outro mais quente e outro ameno, respetivamente Bragança, Évora e Porto.

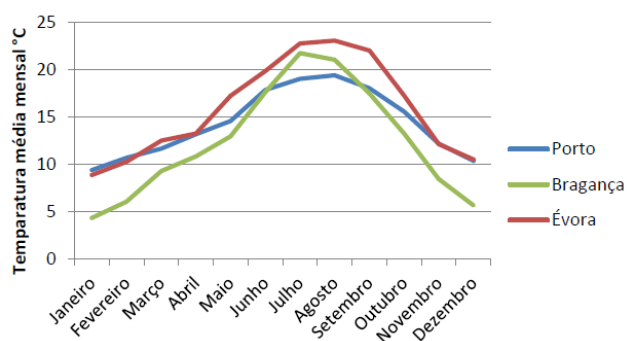


Figura 26 - Média de temperaturas mensais dos três climas analisados [45]

4.3.2. Análise do cenário base

Pela análise do cenário base, onde se define um caudal de ar novo mínimo fixo de forma constante, de acordo com o método analítico de cálculo do ar novo insuflado, é possível verificar numa primeira instância que o novo método não tem em conta as infiltrações no edifício, o que vai provocar um sobredimensionamento no caudal de ar novo mesmo este sendo calculado em função da manutenção dos níveis de concentração de CO₂ abaixo de um valor limite. O que acontece na realidade, é que utilizar um caudal de ar novo calculado de forma a manter os níveis de concentração de CO₂ abaixo dos 1250 [ppm] de acordo com a ocupação, vai provocar um valor de concentração de CO₂ abaixo desse valor. No cenário base, o cálculo de caudal de ar novo foi de 0,065 [m³/s], o que resultaria uma concentração máxima de CO₂ de 1250 [ppm] para um máximo de 10 ocupantes num espaço de 350 [m³] caso não houvesse infiltrações. Sendo que neste cenário introduziu-se um valor de infiltrações de 0,1 rph, o que resultou, para os cenários de edifícios de escritório num valor máximo de concentração de 1100 [ppm], e no edifício comercial de 1050 [ppm], valor abaixo do limite máximo de 1250 [ppm] definido do regulamento, tendo consequências a nível de consumos. Onde aplicar uma estratégia DCV vai permitir adequar o ar novo em função das variações da ocupação, indo ao encontro do *set-point* definido.

4.3.3. Resultados Obtidos

Os gráficos da Figura 27 e Figura 28 apresentam o consumo do aquecimento, arrefecimento e da ventilação para as diferentes estratégias de controlo adotadas, nas três regiões climáticas escolhidas. Analisando o cenário base, é possível perceber que Évora é a região com maiores necessidades de arrefecimento e menores necessidades de aquecimento. Numa situação oposta encontra-se Bragança, uma vez que esta zona tem caracteristicamente Invernos mais rigorosos. Sendo o Porto a zona climática mais amena. O gráfico da Figura 29 apresenta a diferença percentual dos consumos energéticos das diferentes estratégias de ventilação em relação ao cenário base. É perceptível que em edifícios com ocupação típica de um edifício comercial, onde esta é mais inconstante e imprevisível, obtenham-se melhores resultados do que em edifícios de escritório, onde a ocupação é mais constante e se encontra perto do seu limite máximo.

Fazendo uma análise na estratégia DCV em função da região climática, é perceptível que em climas com maiores necessidades de aquecimento, se obtêm melhores resultados de poupança energética. Isto deve-se ao facto de que nestes climas na estação de aquecimento, as condições de temperatura exterior encontram-se mais afastadas das condições de set-point definidas. Já na estação de arrefecimento, por vezes utilizar mais caudal de ar novo até é benéfico, uma vez que este se encontra em condições perto das de set-point e necessita de menos energia a climatizar do que utilizar um caudal misturado com menos quantidade de ar novo. Este facto explica que em climas com menos necessidades de aquecimento, como o Porto e Évora, se tenham obtido consumos energéticos superiores ao caso base.

Analisando o comportamento das diferentes estratégias de controlo é possível verificar que a estratégia IAQP obtém melhores resultados de redução do consumo, uma vez que neste controlo se utiliza um menor caudal de ar novo em relação aos restantes, o que vai diminuir os consumos, principalmente devido à diminuição das necessidades de aquecimento.

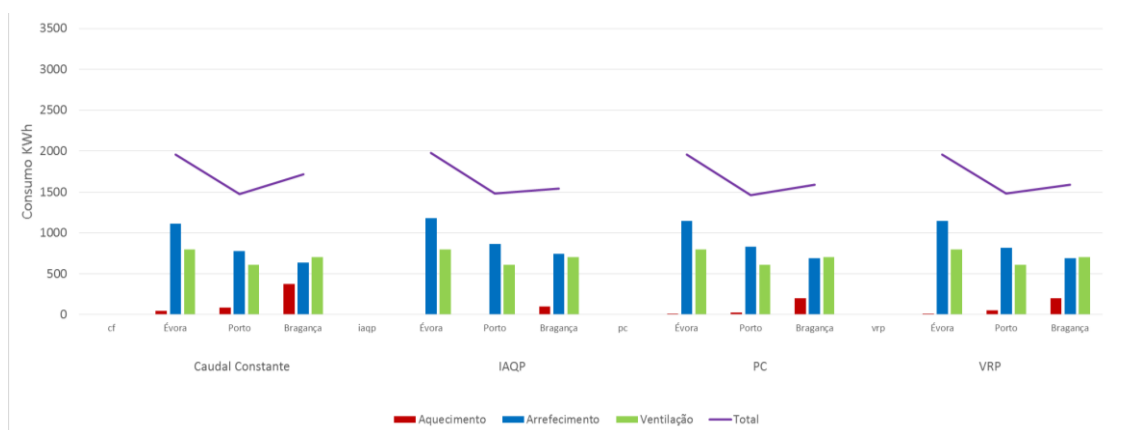


Figura 27 - Distribuição de consumos dos sistemas AVAC nos diferentes cenários para uma ocupação típica de um edifício de escritório

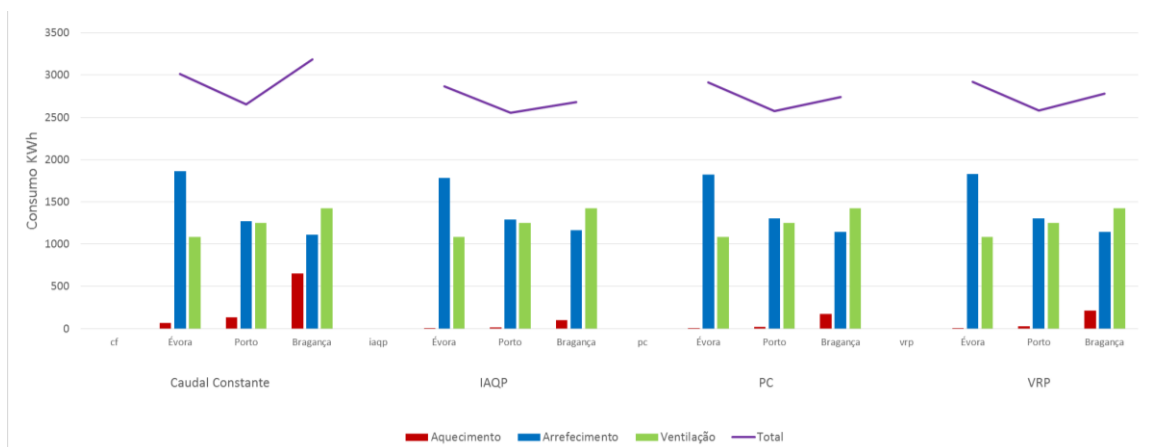


Figura 28 – Distribuição de consumos dos sistemas AVAC nos diferentes cenários para uma ocupação típica de um edifício comercial

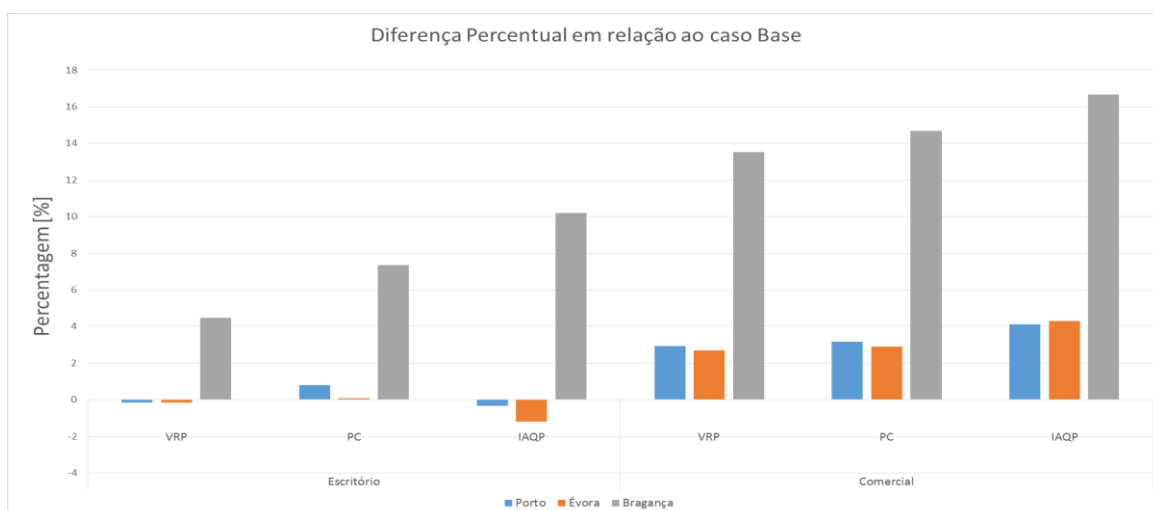


Figura 29 – Diferença percentual das diferentes estratégias de controlo em relação ao cenário base

5. Caso de Estudo - Palácio do Gelo Shopping

Neste capítulo vai-se apresentar um caso de estudo, onde se desenvolveu a simulação dinâmica do edifício Palácio do Gelo Shopping localizado em Viseu, com particular enfoque nas zonas de circulação. Na qual se estudou o efeito da aplicação de um controlo DCV nos sistemas AVAC que climatizam as zonas de circulação, de forma a verificar o potencial de ferramentas de simulação dinâmica no que respeita ao uso de um controlo DCV para o caso de um edifício real. Neste capítulo também se apresenta o resultado da utilização de um controlador DCV, desenvolvido na plataforma *Arduino*, aplicado aos sistemas AVAC que climatizam as lojas do edifício.

5.1. Simulação Dinâmica do Palácio do Gelo Shopping.

A simulação dinâmica consiste em analisar num modelo o comportamento energético do edifício, integrando parâmetros como, a ocupação, iluminação, sistemas AVAC, a envolvente do edifício, e os dados climáticos da região onde o edifício se encontra. A simulação dinâmica foi desenvolvida no *software DesignBuilder*, onde posteriormente foi introduzido o controlo DCV no *EnergyPlus*.

5.1.1. Envolvente do edifício

O edifício tem uma área total de aproximadamente 185000 m² incluindo zonas técnicas, parques de estacionamento, espaços de circulação, ginásios, hipermercado, cinemas e lojas. As áreas foram consultadas diretamente do projeto do edifício em desenhos CAD, os quais foram importados para o *DesignBuilder*, sendo o edifício desenhado de acordo com as dimensões das plantas. O modelo desenvolvido no *DesignBuilder* apresenta um desvio de 0,1% da área medida a partir dos desenhos CAD. As soluções construtivas utilizadas na modelação do edifício, encontram-se em anexo, onde as suas características foram retiradas do ITE 50, e as propriedades dos envidraçados foram consultadas no IGDB (*The International Glazing Database*).

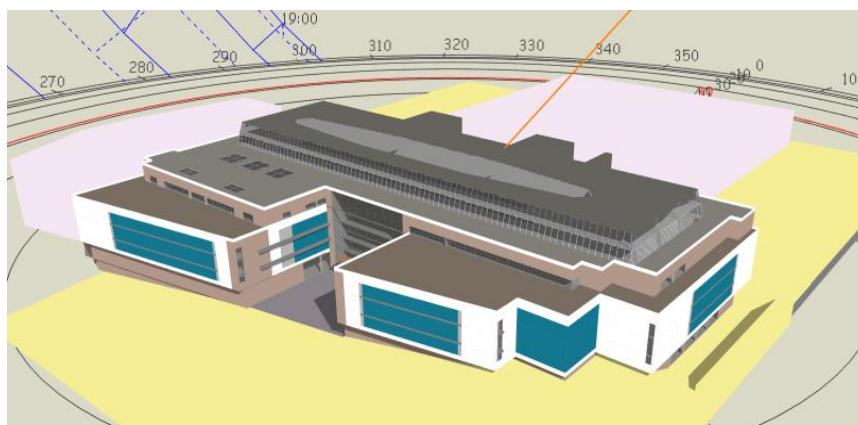


Figura 30 - Representação gráfica do Palácio do Gelo Shopping desenvolvido no software *DesignBuilder*

5.1.2. Sistemas de Climatização

O Palácio do Gelo Shopping contém dois tipos de sistemas AVAC, UTAS (Unidades de Tratamento de ar) e UTANS (Unidades de tratamento de ar novo). As UTAS climatizam as zonas de circulação do edifício, são constituídas por sistemas CAV e contêm controlo *free-cooling*, onde utilizam um valor mínimo de ar novo de 25%, sendo que este valor aumenta para 100% quando existem condições favoráveis.

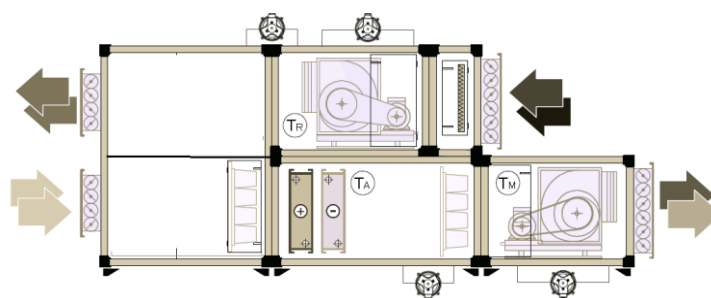


Figura 31 – Representação esquemática de uma UTA [46]

Para climatização dos espaços comerciais, lojas e zonas análogas, o edifício contém UTANS (Unidades de Tratamento de Ar novo), cuja função é de apenas renovação do ar interior, onde cada loja contém unidades terminais que cumprem os requisitos de climatização do ambiente interior. Estes sistemas funcionam com 100% de ar novo e insuflam ar de uma forma constante num determinado horário de funcionamento definido. Sendo que foi para este tipo de sistemas que o controlador DCV foi desenvolvido.

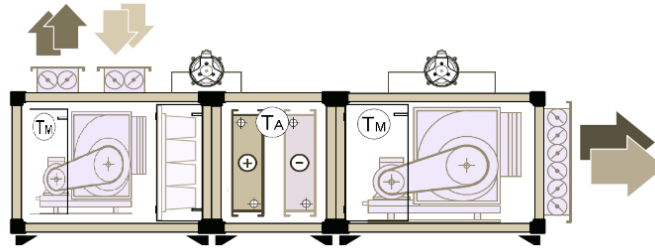


Figura 32 - Representação esquemática de uma UTAN [46]

No *DesignBuilder* introduziram-se os sistemas que climatizam as zonas de circulação, os seus componentes e o seu comportamento. Em específico, definiram-se os *set-points* de climatização e os horários de funcionamento em vigor. Definiu-se também a zonas de influência que cada UTA tem. No total, para as zonas de circulação existem 11 máquinas distribuídas pelos 6 andares abertos ao público.

As especificações de potência dos equipamentos utilizados encontram-se na tabela abaixo, onde se encontra os valores de potência dos ventiladores de insuflação e extração, como também a potência de arrefecimento e aquecimento de cada equipamento.

Tabela 14 – Características Técnicas dos Equipamentos AVAC do Palácio do Gelo Shopping

Equipamento	Ventilador	Potência elétrica [KW]	Caudal [m ³ /s]	Potência de arrefecimento [KW]	Potência de aquecimento [KW]
UTA -2,1	insuflação	7,63	11,27	211,00	286,00
	-	-	-		
UTA -1,1	insuflação	11,70	10,01	200,00	274,00
	extração	4,65	9,99		
UTA 0,1	insuflação	6,53	6,48	113,00	154,00
	extração	3,52	6,40		
UTA 0,2	insuflação	5,54	6,40	114,00	106,00
	extração	2,73	6,36		
UTA 1,1	insuflação	4,02	6,16	143,00	137,00
	extração	2,28	6,18		

UTA 1,2	insuflação	5,62	6,40	132,00	107,00
	extração	3,17	6,36		
UTA 2,1	insuflação	3,73	6,16	112,00	105,00
	extração	2,46	6,18		
UTA 2,2	insuflação	7,40	6,50	132,00	107,00
	extração	3,52	6,48		
UTA 3,1	insuflação	6,89	8,31	146,00	139,00
	extração	4,15	8,28		
UTA 3,2	insuflação	11,40	9,83	195,00	152,00
	extração	4,59	9,83		
UTA 3,3	insuflação	7,94	8,09	146,00	139,00
	extração	2,98	8,06		

5.1.3. Ocupação

O edifício contém um grupo de sensores que contabilizam o número de ocupantes. Os sensores estão localizados, nas entradas, escadas rolantes e elevadores. Os dados fornecidos pelos sensores são contabilizados pelo software *FootFall*, o qual disponibiliza dados como, entradas, saídas e o fluxo dos ocupantes em termos horários. Extraíu-se dados do *software* relativamente ao ano de 2012. Onde foi possível obter um valor de [ocupantes/m²] para cada andar, hora a hora. Ou seja, obteve-se um valor máximo de ocupação para cada andar, em que se elaborou uma semana típica de ocupação para cada mês em valores percentuais, onde apenas em Dezembro se atinge o valor máximo de 100%, uma vez que é o mês que apresenta maior ocupação. Desta forma é possível diferenciar a taxa de ocupação ao longo do ano e principalmente a ocupação que ocorre ao longo do dia nos diferentes dias da semana. Para o modelo elaborado, estabeleceu-se que o nível de atividade dos ocupantes corresponde a 1,27 [met].

O gráfico da Figura 33 mostra um exemplo dos dados retirados para uma semana típica, neste caso o mês de Outubro, sendo que este método foi utilizado para os restantes meses do ano.

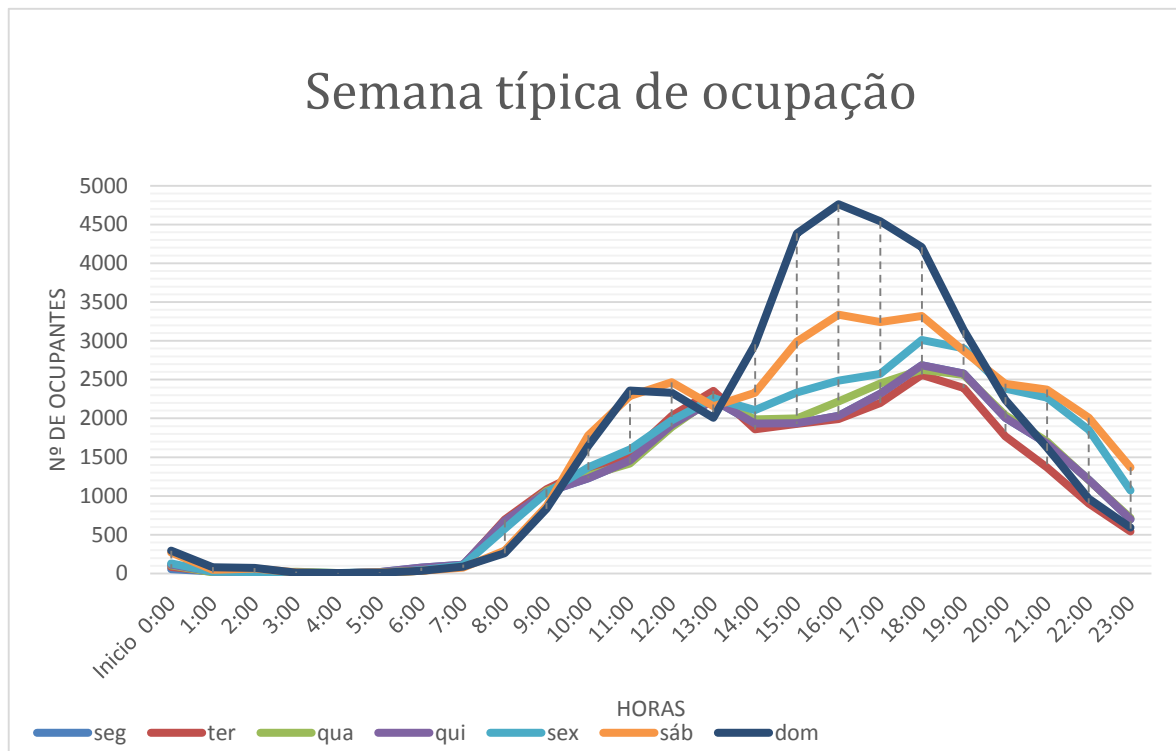


Figura 33 – Semana típica da ocupação do mês de Outubro do Palácio do Gelo Shopping

5.1.4. Sistemas de Iluminação

A iluminação do Palácio do Gelo Shopping, tem um impacto bastante elevado nos consumos do edifício, uma vez que se trata de um edifício com bastantes visitantes e onde o horário de funcionamento é bastante alargado. Através do projeto de iluminação fornecido, foi possível quantificar a densidade de iluminação das diferentes zonas do Palácio do Gelo Shopping.

De forma a contabilizar qual a densidade de iluminação nas diferentes zonas do Palácio do Gelo Shopping contabilizou-se todas as lâmpadas de diferentes potências e tipologias existentes nos diferentes locais da zona de circulação do edifício, dividiu-se pelas respetivas áreas, e assim chegou-se a um valor de densidade de potências ($D [W/m^2]$) necessário para introduzir no programa. Outro parâmetro que é necessário introduzir na simulação é a densidade de potência relativa ($Dr [W/m^2 \cdot 100lx]$). Este valor determinou-se com o auxílio de um luxímetro, onde se foi medir o nível de iluminação (lux), nos diferentes espaços do Palácio do Gelo Shopping. Os resultados desta análise estão demonstrados na Tabela 15.

Tabela 15 – Densidades de Iluminação

ZONA	D [W/m ²]	Dr [W/m ² -100lux]
Circulação entrada Pg	10,58	15,11
Circulação central Pg	10,69	4,55
Circulação ponta Este	18,54	5,15
Zona de Estar	8,11	5,59
Praça de Alimentação	12,76	6,38
WC's	9,83	6,55
Circulação Junto Piscinas	10,53	3,29

5.1.5. Controlo DCV implementado

A estratégia DCV escolhida para aplicar nos sistemas do Palácio do Gelo Shopping, foi a *IAQP* – *Indoor Air Quality Procedure*, uma vez que esta foi a que demonstrou maiores poupanças energéticas no estudo paramétrico desenvolvido no capítulo 4. Este controlo foi introduzido nas UTAS, onde o ar novo insuflado é regulado através dos registos de ar novo. O caudal de ar novo vai ser modelado de forma a se manter o *set-point* desejado. Sendo que os equipamentos contêm controlo *free-cooling*, quando as condições climatéricas se encontram favoráveis para aplicação dessa estratégia, o registo de ar novo pode abrir e introduzir mais ar novo do que o necessário para manter os níveis de concentração de CO₂. O *setpoint* da concentração de CO₂ definido foi de 1000 [ppm], e a concentração do ar exterior foi definida como 400 [ppm].

5.1.6. Resultados

O gráfico da Figura 34 apresenta a distribuição dos consumos, em específico para as zonas de circulação, onde é possível verificar que a principal fonte de consumo se deve ao arrefecimento, com um total de 2,39 [GWh/ano], de seguida a iluminação é responsável por 1,21 [GWh/ano], a ventilação consome cerca de 0,54 [GWh/ano], e o aquecimento cerca de 0,25 [GWh/ano].

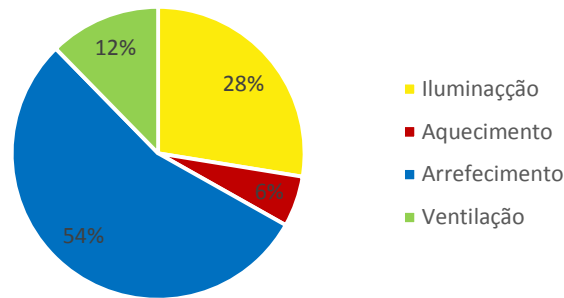


Figura 34 – Distribuição de consumos da zona de circulação

Em termos comparação de consumos térmicos através da aplicação da estratégia DCV, é perceptível pelo gráfico da Figura 35, que os consumos de aquecimento diminuem bastante, o que é facilmente explicado, uma vez que é no início e fim do dia, alturas em que se necessita de maior aquecimento, que existe menor ocupação, e consequentemente melhores índices de qualidade do ar interior. Desta forma, nessas alturas praticamente não é necessário ar novo evitando assim aquecer o mesmo. Em relação ao arrefecimento, este tem o maior decréscimo no verão, uma vez que nesta estação é necessária mais energia para arrefecer o ar exterior, e diminuir a introdução de ar novo, diminui os consumos energéticos.

Obteve-se uma redução de 213,32 MWh de energia térmica para aquecimento e 183,56 MWh de energia térmica de arrefecimento. O que corresponde a uma redução de 13% dos consumos totais dos sistemas AVAC.

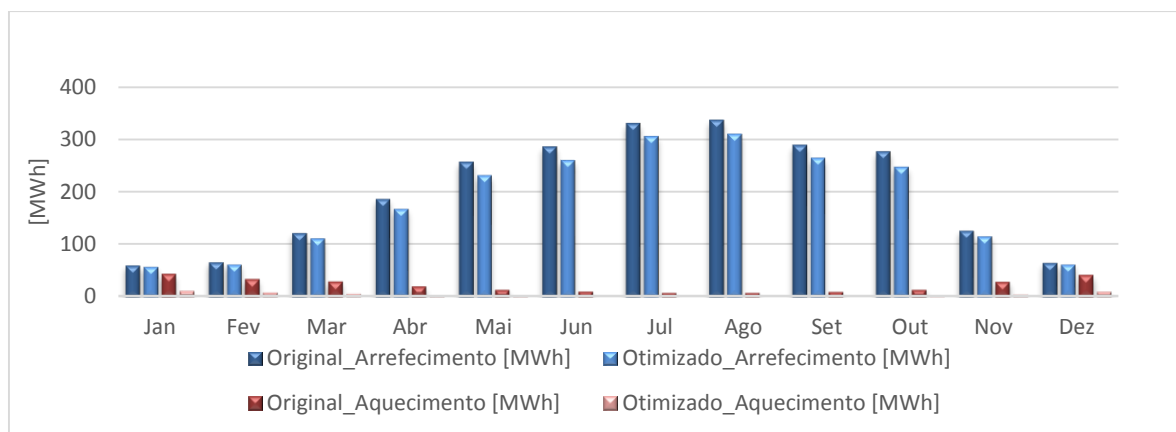


Figura 35 – Comparação de consumos térmicos mensais do edifício original com a implementação da estratégia DCV

5.2. Controlador DCV

Uma vez já utilizado a simulação dinâmica para prever o efeito que o controlo DCV tem nos consumos, desenvolveu-se um controlador DCV com um princípio de funcionamento On/Off, de forma a analisar o funcionamento de um controlador funcional aplicado na prática.

O controlador DCV foi desenvolvido para se aplicar nas UTANS, uma vez que estas têm a função de apenas introduzir ar novo, e não de propriamente climatizar o edifício. O controlador tem como função ligar e desligar o ventilador de insuflação de acordo com os níveis de CO₂. Para isso, o controlador contém um sensor de CO₂ que é colocado na conduta de extração, o qual vai detetar a concentração de CO₂ do ar extraído da zona controlada. Sendo que o ventilador de extração estará sempre em funcionamento, enquanto o de insuflação é que estará a ser controlado. O sensor de CO₂ emite um sinal para o controlador e de acordo com esse sinal o controlador vai atracar os relés que estão ligados ao ventilador, fazendo-o ligar e desligar. Foi estabelecido que o ventilador apenas seria atuado quando os níveis de concentração de CO₂ atingissem os 900 [ppm], e desligado quando os níveis de concentração de CO₂ descessem abaixo dos 750 [ppm]. Evitando assim a sobre ventilação do espaço e gasto de energia desnecessário.

5.2.1. Desenvolvimento do Controlador DCV

O controlador DCV, foi desenvolvido na plataforma *Arduino*. Esta é uma plataforma de prototipagem eletrónica *open-source*, baseada em *hardware* e *software* flexível e fácil de utilizar. É destinado a qualquer pessoa interessada em criar ferramentas ou ambientes interativos, tendo um aspeto e forma de trabalho bastante *user-friendly*. O *Arduino* pode perceber o ambiente, através da utilização de uma variedade de sensores, que por sua vez vão afetar outros sistemas como luzes, motores e outros atuadores. A placa do microcontrolador é programada usando a linguagem de programação baseada em C/C++. [arduino.cc] O código fonte desenvolvido encontra-se em anexo. Na Figura 36 está representado o esquema do controlador desenvolvido, onde os componentes utilizados estão representados na Tabela 16.

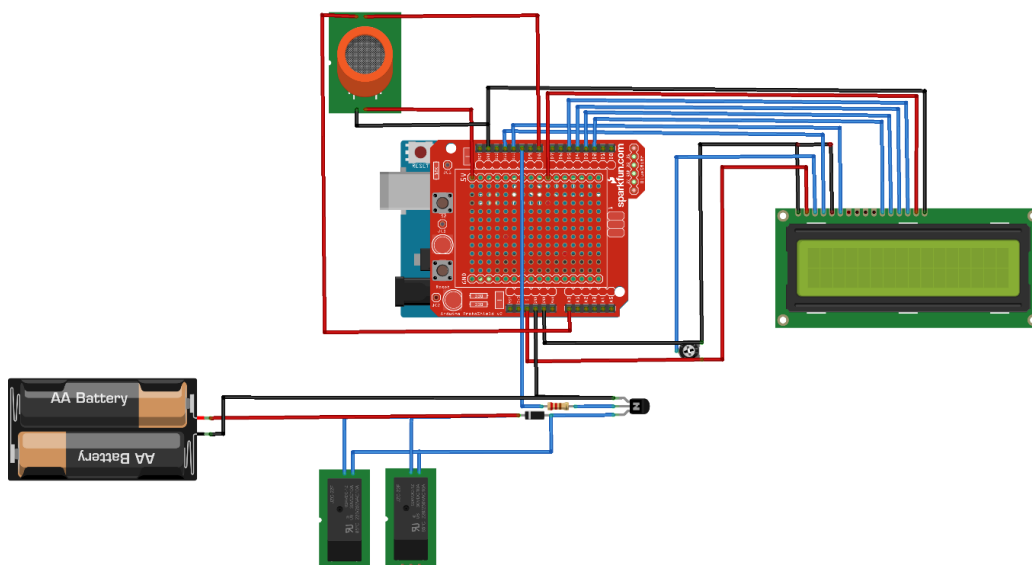


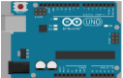



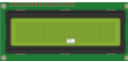




Figura 36 – Representação esquemática do controlador desenvolvido

Tabela 16 – Lista de Componentes utilizados no desenvolvimento do controlador

Componentes Eletrônicos Utilizados								
Sensor de CO ₂	Transistor	Arduíno UNO	Shield Arduíno	Díodo	Resistência	Ecrã LCD	Potenciômetro	Relé
								

5.2.2. Calibração sensor de CO₂

O sensor de CO₂ utilizado opera segundo uma reação reversível baseada no princípio de oxidação-redução. O ar entra em contacto com uma superfície semicondutora, o que faz desencadear uma reação de oxidação, provocando uma alteração na resistividade do semicondutor, esta alteração é medida por uma variação da voltagem. [43] O sensor utilizado foi o MG811, e para calibração do mesmo, utilizou-se um equipamento de medição da qualidade do ar interior TESTO 435, de forma a comparar valores de concentração medido pelos dois equipamentos. O gráfico da Figura 37 – Sensibilidade do sensor de CO₂ mostra uma curva da sensibilidade do sensor em relação a vários gases, sendo que a linha azul representa a variação da tensão em função da concentração de CO₂. Foi encontrado um valor base da tensão quando

o sensor se encontra num ambiente com uma concentração de CO₂ de 400 [ppm], e um valor de variação da tensão entre os 400 [ppm] e os 1000 [ppm], com auxílio do equipamento Testo 435. E de acordo com a seguinte equação, o controlador determina o valor da concentração de CO₂ que o sensor está a ler.

$$V_s = V_0 + \frac{\Delta V_s}{(\log_{10} 400 - \log_{10} 1000) \times (\log_{10} C_{CO_2} - \log_{10} 400)} \quad (35)$$

Onde:

$$\Delta V_s = \text{output do sensor@400ppm} - \text{output do sensor@1000ppm} \quad (36)$$

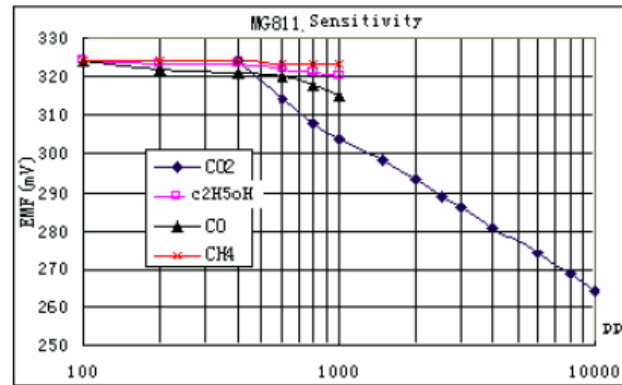


Figura 37 – Sensibilidade do sensor de CO₂

5.3. Experiência desenvolvida

Colocou-se a ferramenta desenvolvida a monitorizar a UTAN durante 3 dias onde a ocupação é maior, nomeadamente sexta-feira, sábado e domingo. Sendo que os dados de ocupação foram retirados de um sistema de deteção do número de visitantes implementado no edifício. Foi então contabilizada a ocupação do edifício no seu global, e da zona monitorizada em específico. Juntamente com o controlador desenvolvido colocou-se um sistema de aquisição de dados de forma a captar os níveis de CO₂, e saber a sua evolução ao longo do dia.

Os gráficos abaixo mostram a variação dos níveis de CO₂ e ocupação nos três dias de duração do estudo. Onde os níveis de CO₂ estão representados pela linha bege, que fica vermelha quando os níveis de CO₂ são mais elevados. A área a verde representa o fluxo da ocupação com um intervalo de 15 minutos no global do edifício, e a área representada a azul, representa o fluxo de pessoas captado pelos sensores na zona onde as lojas se encontram.

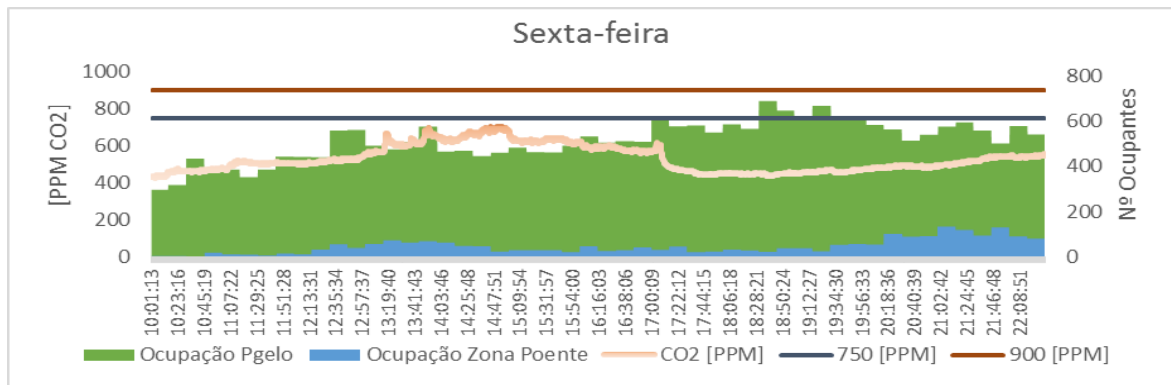


Figura 38 - Evolução dos níveis de CO₂ do estudo feito na sexta-feira

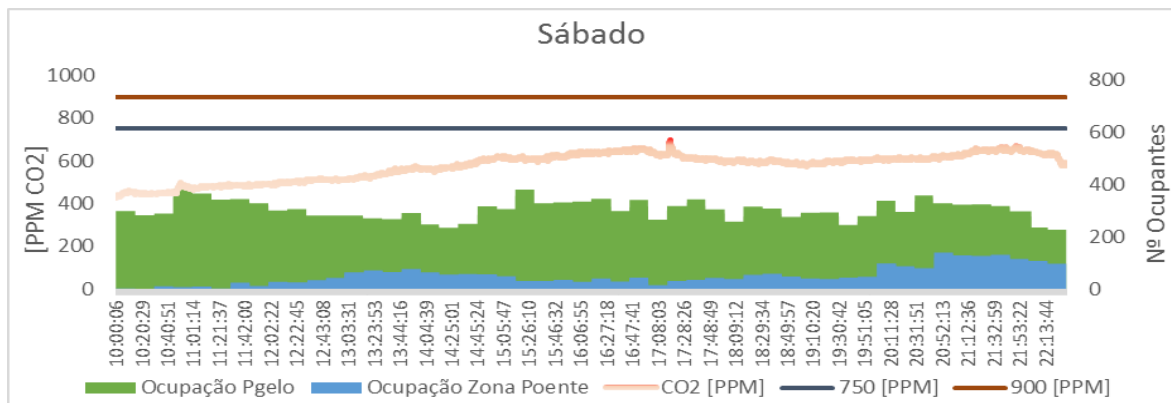


Figura 39 - Evolução dos níveis de CO₂ do estudo feito no Sábado

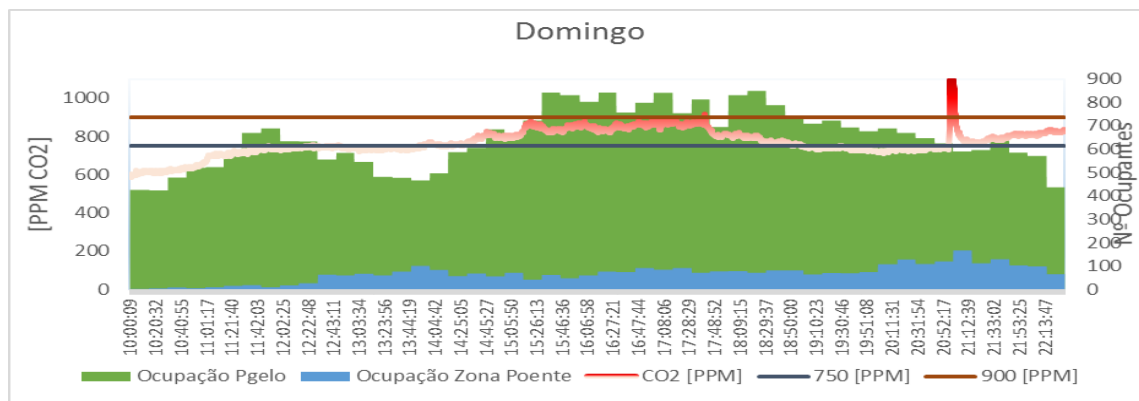


Figura 40 - Evolução dos níveis de CO₂ do estudo feito no Domingo

Em termos gerais pode-se comprovar que ao existir uma maior densidade de ocupação, efetivamente os níveis de CO₂ são mais elevados. Analisando mais ao pormenor, comprova-se que apenas no Domingo, dia de maior ocupação, foi necessário ar novo, e que o sistema foi ativo. A linha a castanho mostra o limite de CO₂ em que é necessário introduzir ar novo 900 [ppm], e a linha azul mostra o nível de CO₂ em que o sistema desliga o ar novo 750 [ppm]. Desta forma o sistema ligou às 17:40h de Domingo, desligou as 18:50h, e voltou a ligar apenas às 21:00h e assim se manteve até ao final do dia. Analisando a evolução dos níveis de CO₂ em função da ocupação, é perçetível que nos dias em que há mais ocupação no global do edifício, área a verde, os níveis de CO₂ são mais elevados, sendo que a ocupação nas zonas monitorizadas, área a azul, origina os picos na concentração de CO₂ obtidos. No domingo às 21:00h atingiu-se o máximo de concentração de CO₂, apesar da ocupação no global do edifício já estar a diminuir. Mas se se observar com atenção, foi nessa mesma altura que se atingiu o pico da ocupação na zona monitorizada. Em termos de desempenho, conclui-se que o sistema em vez de estar ligado 37:30h nos três dias, teve apenas ligado 2:40h, ligando-se apenas 7% do tempo que estaria se não houvesse controlo da qualidade do ar. Foi medido o consumo do ventilador com auxílio do analisador de corrente, e determinou-se que este tem uma potência real de 2,1 [kW], tendo em conta que por dia o equipamento está ligado 12:30h, obteve-se uma redução do consumo elétrico durante o tempo da experiência de aproximadamente 73kWh, 93% do consumido em normal funcionamento.

6. Conclusões e perspectivas futuras

A realização da presente dissertação teve como objetivo central o estudo do impacto do plano de ventilação DCV no consumo energético de edifícios, tendo em vista a manutenção da qualidade do ar interior.

Foi caracterizado o potencial do *EnergyPlus* no que respeita ao controlo da ventilação da estratégia DCV, onde se verificou existirem três estratégias possíveis de simulação da estratégia DCV, as quais se adaptam a controlos reais aplicados aos sistemas AVAC, a *Indoor Air Quality Procedure*, a *Proportional Control* e a *Ventilation Rate Procedure*. Foi ainda concluído que seria interessante introduzir um controlo *On/Off* e controlo *PID – Proportional Integrative Derivative*. Uma vez que estas formas de controlo também se mostram interessantes do ponto de vista de simularem casos reais.

No âmbito do trabalho desenvolvido fez-se uma análise do desempenho de diferentes estratégias de controlo DCV, em função do clima onde o edifício se encontra, e de acordo com a ocupação do mesmo. Onde se analisou o método de cálculo definido pela nova Portaria Técnica, comparando-o com a implementação de três estratégias DCV através de simulação dinâmica no *software EnergyPlus*.

Através da comparação da aplicação de estratégias DCV com a utilização de um caudal de ar novo mínimo chegou-se à conclusão do seguinte:

- A utilização de uma estratégia DCV pode trazer vantagens em termos de redução dos consumos, principalmente em climas frios, onde predominam as necessidades de aquecimento. Podendo contudo apresentar resultados negativos em termos de consumos energéticos em climas amenos e climas quentes, nomeadamente se a função *free-cooling* for negligenciada no processo de controlo;
- Edifícios com grandes variações de ocupação têm maior potencial de poupança energética do que em edifícios onde a ocupação é mais constante e próxima do seu máximo dimensionado;
- A estratégia DCV, onde se obteve maior redução de consumo, em climas frios, é a *IAQP – Indoor Air Quality Procedure*, uma vez que esta permite manter os níveis de CO₂ mais próximo do seu limite e consequentemente menos introdução de ar novo;

- O aumento dos consumos energéticos provocados pela implementação de uma estratégia DCV em climas amenos, deve-se ao facto de se introduzir menos ar novo quando este se encontra com maior frequência em condições favoráveis para a climatização em regime de free-cooling, provocando um maior gasto energético ao arrefecer o ar recirculado em detrimento da insuflação de ar exterior, a uma temperatura mais favorável.
- Em termos quantitativos, aplicar uma estratégia DCV num clima como o de Bragança num edifício tipicamente comercial permite em média uma poupança de 15% em relação a um sistema CAV. Enquanto que um edifício de escritório o potencial de poupança de uma estratégia DCV no clima de Bragança é de 7%.
- Para um clima ameno, como o caso do Porto, a implementação de uma estratégia DCV tem um potencial de poupança energética de 3% dos consumos totais dos sistemas AVAC num edifício comercial. Já num edifício de escritório, não existem poupanças podendo até ter maiores consumos.
- O desempenho da estratégia DCV num clima quente, como o de Évora, tem aproximadamente o mesmo potencial de poupança do que num clima ameno, como o do Porto.

A implementação do controlo DCV no caso de estudo Palácio do Gelo Shopping, mostrou-se eficaz no que respeita à redução dos consumos. O Palácio do Gelo Shopping é um edifício comercial com ocupação bastante variável e encontra-se num clima frio, Viseu, comprovando assim a eficácia deste controlo em edifícios semelhantes tal como confirmado no estudo paramétrico.

Foi possível ainda testar a eficácia da aplicação de um controlador DCV On/Off num caso real, permitindo também analisar o comportamento da estratégia DCV experimentalmente e não só através de ferramentas de simulação dinâmica.

6.1. Limitações e Trabalho Futuro

A principal limitação do trabalho desenvolvido está relacionada com a incapacidade de, com os meios disponíveis, verificar com rigor necessário todas as variáveis inerentes ao controlo DCV durante o desenrolar da experiência realizada. De facto, num edifício tão grande e complexo

como o Palácio do Gelo Shopping é difícil quantificar com rigor variáveis como, infiltrações, variações da ocupação e trocas de ar que ocorrem com outras zonas não controladas. Seria interessante que num trabalho futuro se pudesse testar o controlador num ambiente mais controlado, de forma a verificar os resultados obtidos analiticamente. Outra proposta de trabalho futuro seria desenvolver e testar outros tipos de controlo, *Proportional Control*, *Set-point Control*, e *PID control*, em ambientes reais, no sentido de verificar o desempenho dos mesmos.

Desenvolver um módulo de simulação de controlo PID e On/Off de forma a complementar as formas de controlo do tipo DCV no *EnergyPlus* traria valor acrescentado ao modelo e permitiria abranger a simulação de um número maior de estratégias de controlo possíveis de implementar em casos reais.

Outra sugestão de trabalho futuro prende-se em analisar o desempenho das diferentes estratégias DCV com a combinação de outras formas de controlo da ventilação, como por controlo VAV e controlo *free-cooling*. Sendo ainda interessante analisar o efeito da estratégia DCV no conforto adaptativo em escritórios.

Bibliografia

- [1] european council for an energy efficient Economy, "Energy efficiency policy in Europe: work in progress." [Online]. Available: http://www.eceee.org/policy-areas/energy-efficiency-policy/Evolving_policy. [Accessed: 10-Sep-2013].
- [2] Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia, "Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação)," *Jornal Oficial da União Europeia*, pp. 13–35, 2010.
- [3] Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações, "Decreto-Lei n.40/90 de 6 de Fevereiro," *Diário da República*, pp. 490–504, 1990.
- [4] Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações, "Decreto-Lei n.79/2006 de 4 de Abril," *Diário da República*, pp. 2416–2468, 2006.
- [5] Z. Bakó-biró, D. J. Clements-croome, N. Kochhar, H. B. Awbi, and M. J. Williams, "Ventilation rates in schools and pupils ' performance," *Building and Environment*, vol. 48, pp. 215–223, 2012.
- [6] Ministério da Economia e do Emprego, "Decreto-Lei n-º 118/2013 de 20 de Agosto," *Diário da República*, pp. 4988–5005, 2013.
- [7] H. Levin, "Indoor Air Pollutants Part 1: general description of pollutants, levels and standards," *Air Infiltration and Ventilation Center*, 2003.
- [8] M. O. Ng, M. Qu, P. Zheng, Z. Li, and Y. Hang, "CO2-based demand controlled ventilation under new ASHRAE Standard 62.1-2010: a case study for a gymnasium of an elementary school at West Lafayette, Indiana," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 11, pp. 3216–3225, Nov. 2011.
- [9] M. W. Liddament, *A Guide to Energy Efficient Ventilation*. Air Infiltration and Ventilation Center, 1996.
- [10] M. W. Liddament, "Occupant Impact on Ventilation," Belgium, 2001.
- [11] C. Dimitroulopoulou, "Ventilation in European dwellings: A review," *Building and Environment*, vol. 47, pp. 109–125, Jan. 2012.
- [12] H. Levin, "Indoor Air Pollutants Part 2: Description of sources and control/mitigation measures," *Air Infiltration and Ventilation Center*, 2004.
- [13] S. Ioan and C. Sebarchievici, "Olfactory Comfort Assurance in Buildings," *Chemistry, Emission Control, Radioactive Pollution and Indoor Air Quality Edited*, pp. 407–428, 2011.

- [14] P. Batog and M. Badura, "Dynamic of Changes in Carbon Dioxide Concentration in Bedrooms," *Procedia Engineering*, vol. 57, pp. 175–182, Jan. 2013.
- [15] I. Sarbu and C. Sebarchievici, "Aspects of indoor environmental quality assessment in buildings," *Energy & Buildings*, vol. 60, pp. 410–419, 2013.
- [16] S. J. Emmerich and A. K. Persily, "State-of-the-Art Review of CO₂ Demand Controlled Ventilation Technology and Application State-of-the-Art Review of CO₂ Demand Controlled Ventilation Technology and Application," *National Institute of Standards and Technology, USA*, 2001.
- [17] P. Tans, "Monthly average CO₂ levels in the atmosphere," *NOAA*, 2013. [Online]. Available: ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_mm_mlo.txt.
- [18] W. F. De Gids and P. Wouters, "CO₂ as indicator for the indoor air quality General principles," *Air Infiltration and Ventilation Center*, no. July, pp. 2–5, 2010.
- [19] "Demand Controlled Ventilation System Design," *Carrier Corporation*, 2001.
- [20] B. M. Schell and D. Inthout, "Demand Control Ventilation Using CO₂," *ASHRAE Journal*, no. February, 2001.
- [21] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ASHRAE Handbook of Fundamentals*. Atlanta, USA, 2009.
- [22] E. Jeannette and T. Phillips, "Designing and Testing Demand Controlled Ventilation Strategies Designing Systems that Utilize DCV," pp. 1–13, 2006.
- [23] J.-W. Jeong, A. Choi, and S.-T. No, "Improvement in demand-controlled ventilation simulation on multi-purposed facilities under an occupant based ventilation standard," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 18, no. 1, pp. 51–62, Jan. 2010.
- [24] N. Li, G. Calis, and B. Becerik-Gerber, "Measuring and monitoring occupancy with an RFID based system for demand-driven HVAC operations," *Automation in Construction*, vol. 24, pp. 89–99, Jul. 2012.
- [25] Architectural Energy Corporation, "Design Brief - Demand Control Ventilation," *Energy Design Resources*, 2007.
- [26] J. R. Sand, "Demand-Controlled Ventilation Using CO₂ Sensors," *Energy Efficiency and Renewable Energy*, 2004.
- [27] James J. Hirsch, "DOE-2 Building Energy Use and Cost Analysis Tool," 2013. [Online]. Available: <http://doe2.com/DOE2/index.html>. [Accessed: 30-Oct-2013].
- [28] J. J. Hirsch, "eQUEST the Quick Energy Simulation Tool." [Online]. Available: <http://doe2.com/equest/index.html>. [Accessed: 30-Oct-2013].
- [29] I. E. S. Limited, "VE-Pro." [Online]. Available: <http://www.iesve.com/software/ve-pro>. [Accessed: 30-Oct-2013].

- [30] U. of I. or the E. O. L. B. N. Laboratory, "EnergyPlus Engineering Reference The Reference to EnergyPlus Calculations," 2013.
- [31] W. Wang, S. Katipamula, Y. Huang, and M. R. Brambley, "Energy savings and economics of advanced control strategies for packaged air conditioners with gas heat," *Energy and Buildings*, vol. 65, pp. 497–507, Oct. 2013.
- [32] N. Nassif and S. Moujaes, "A new operating strategy for economizer dampers of VAV system," *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 3, pp. 289–299, Jan. 2008.
- [33] K.-P. Lee and H.-L. Chen, "Analysis of energy saving potential of air-side free cooling for data centers in worldwide climate zones," *Energy and Buildings*, vol. 64, pp. 103–112, Sep. 2013.
- [34] Honeywell Inc., "Carbon Dioxide (CO₂) HVAC Basics," pp. 1–8, 1998.
- [35] M. Krarti and D. Ph, "Analysis of the Impact of CO₂ -Based Demand-Controlled Ventilation Strategies on Energy Consumption," 2004.
- [36] X.-B. Yang, X.-Q. Jin, Z.-M. Du, B. Fan, and X.-F. Chai, "Evaluation of four control strategies for building VAV air-conditioning systems," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 2–3, pp. 414–422, Feb. 2011.
- [37] M. Mysen, S. Berntsen, P. Nafstad, and P. G. Schild, "Occupancy density and benefits of demand-controlled ventilation in Norwegian primary schools," *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 12, pp. 1234–1240, Dec. 2005.
- [38] Y. Wang, Y. Shao, and C. Kargel, "Demand controlled ventilation strategies for high indoor air quality and low heating energy demand," no. Dcv, pp. 1–6, 2012.
- [39] Y. H. M. B. W Wang S Katipamula, "Energy Savings and Economics of Advanced Control Strategies for Packaged Air-Conditioning Units with Gas Heat," no. December, 2011.
- [40] Y. H. M. B. W Wang S Katipamula, "Energy Savings and Economics of Advanced Control Strategies for Packaged Heat Pumps," no. October, 2012.
- [41] B. C. Manual, E. Information, Y. Need, and R. Energyplus, "Getting Started with EnergyPlus Basic Concepts Manual - Essential Information You Need about Running EnergyPlus," 2013.
- [42] D. B. Crawley, L. K. Lawrie, F. C. Winkelmann, W. F. Buhl, Y. J. Huang, C. O. Pedersen, R. K. Strand, R. J. Liesen, D. E. Fisher, M. J. Witte, and J. Glazer, "EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program," *Energy and Buildings*, vol. 33, no. 4, pp. 319–331, Apr. 2001.
- [43] Siemens, "Demand-controlled ventilation Control Strategy and applications for energy-efficient operation," vol. 36, no. 10, pp. 1029–1034, Oct. 2010.
- [44] ASHRAE, "ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2010, Ventilation for acceptable indoor air quality," *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA, 2010.

- [45] M. A. Vorontsova, “Contributo para a Avaliação da Relevância do Isolamento Térmico em Reabilitação,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [46] C. Industries, “Standard Air Handling Units User manual.” 2010.

Apêndice A

Anexos

A.1. Horários de Ocupação do Palácio do Gelo Shoppinhg

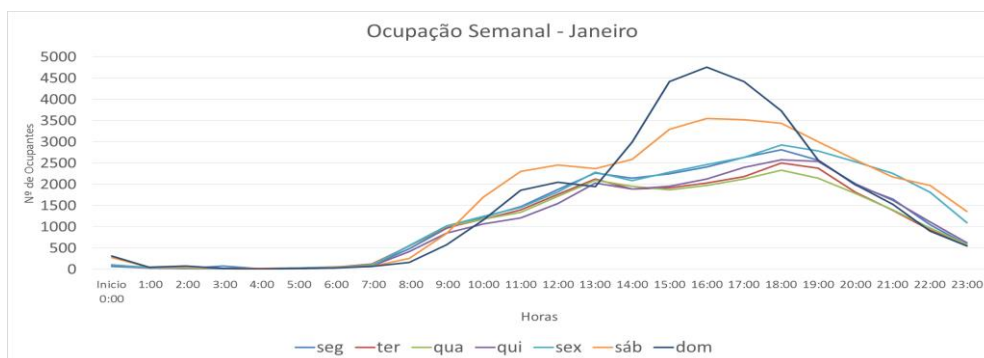


Figura A. 1 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Janeiro

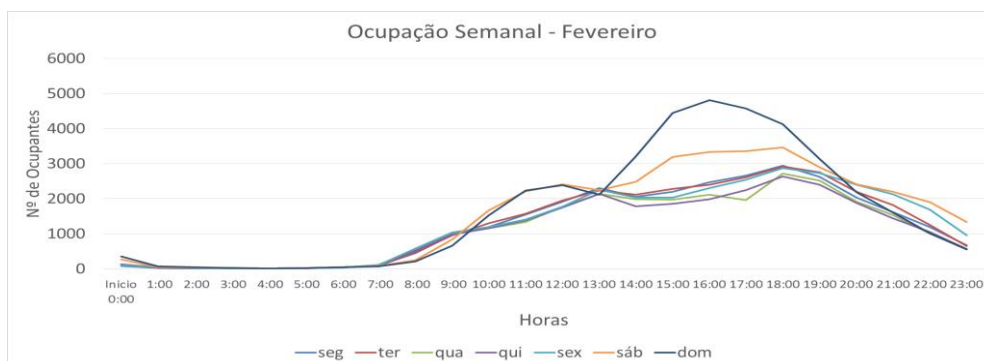


Figura A. 2 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Fevereiro

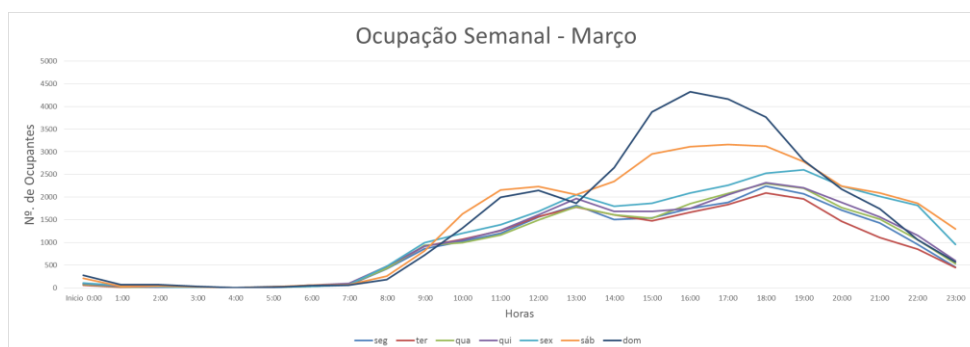


Figura A. 3 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Março

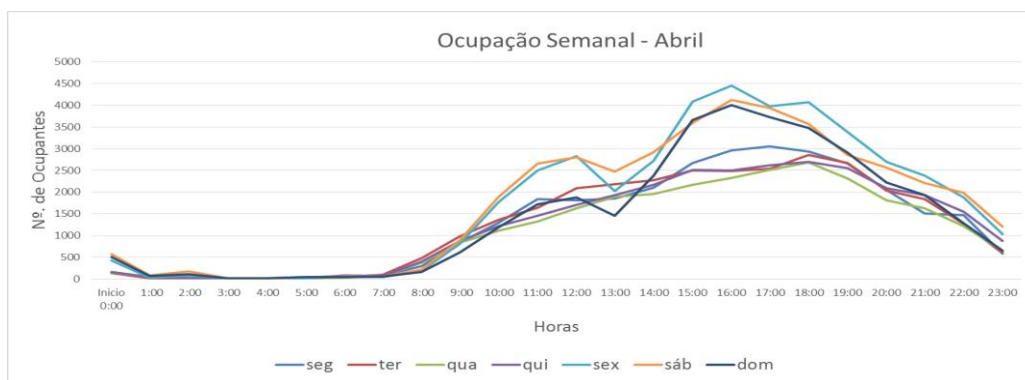


Figura A. 4 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Abril

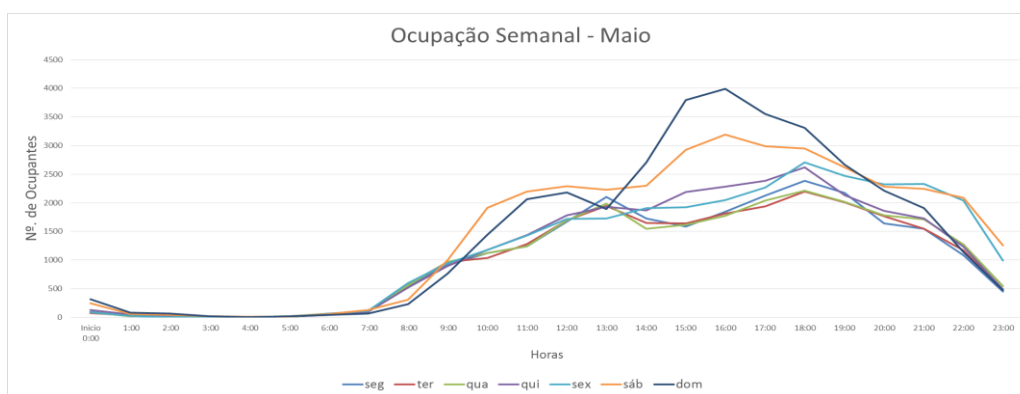


Figura A. 5 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Maio

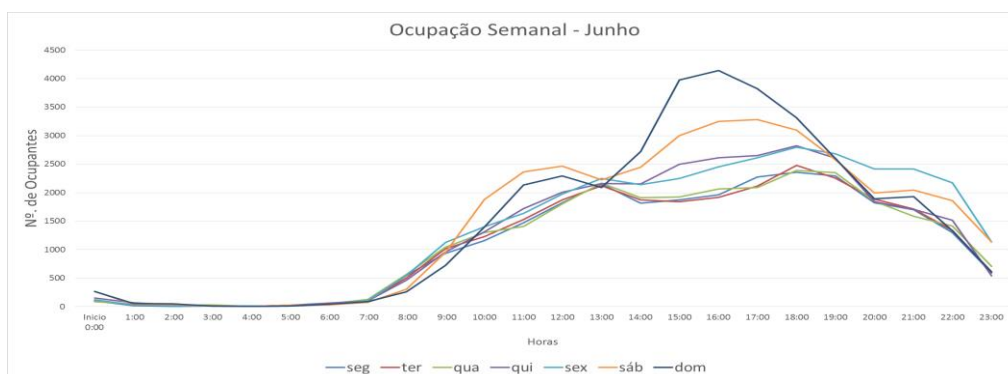


Figura A. 6 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Junho

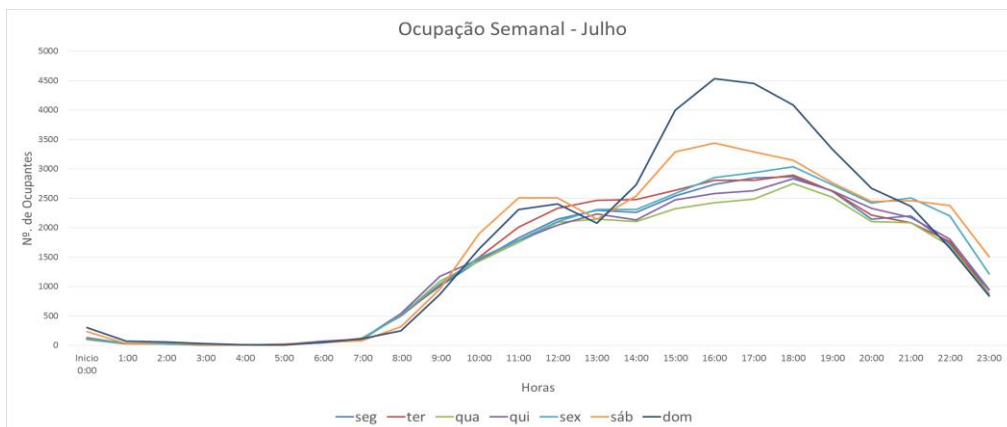


Figura A. 7 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Julho

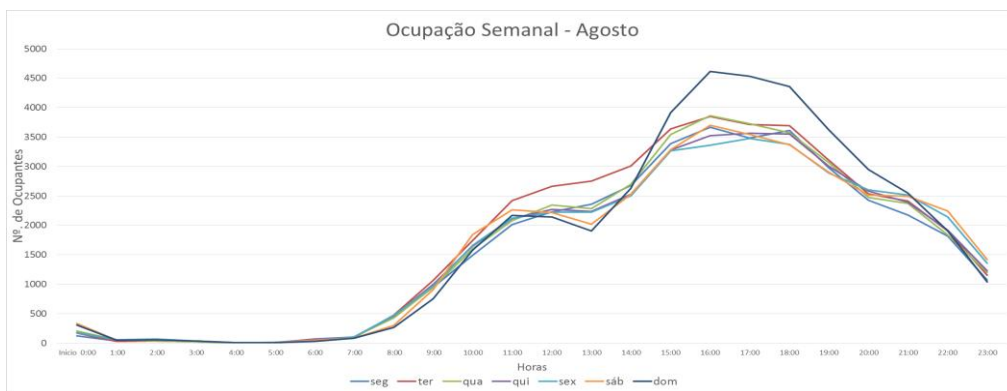


Figura A. 8 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Agosto

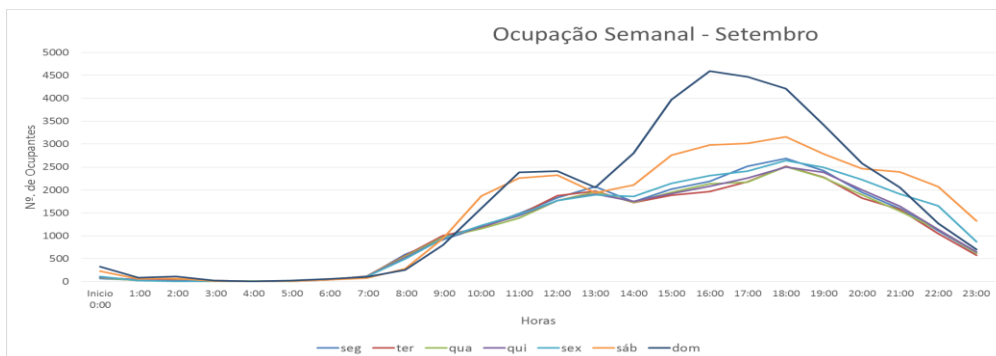


Figura A. 9 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Setembro

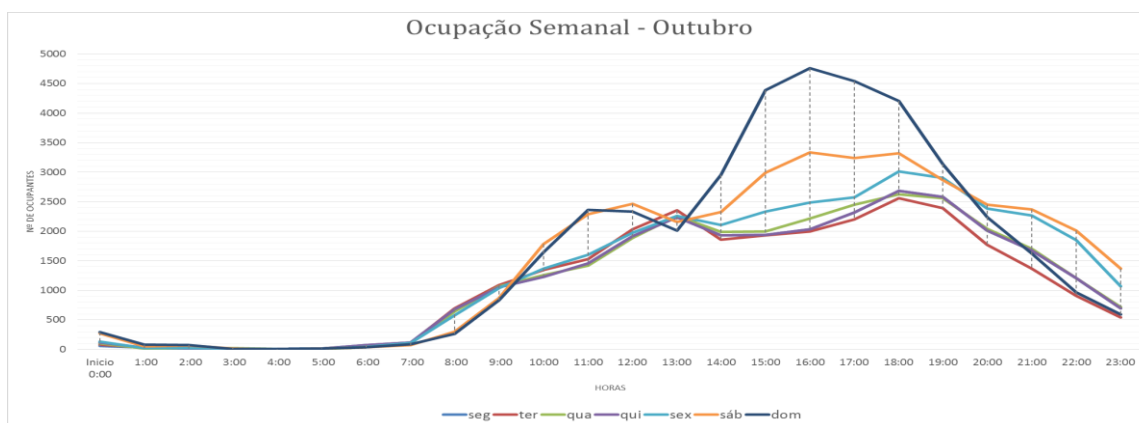


Figura A. 10 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Outubro

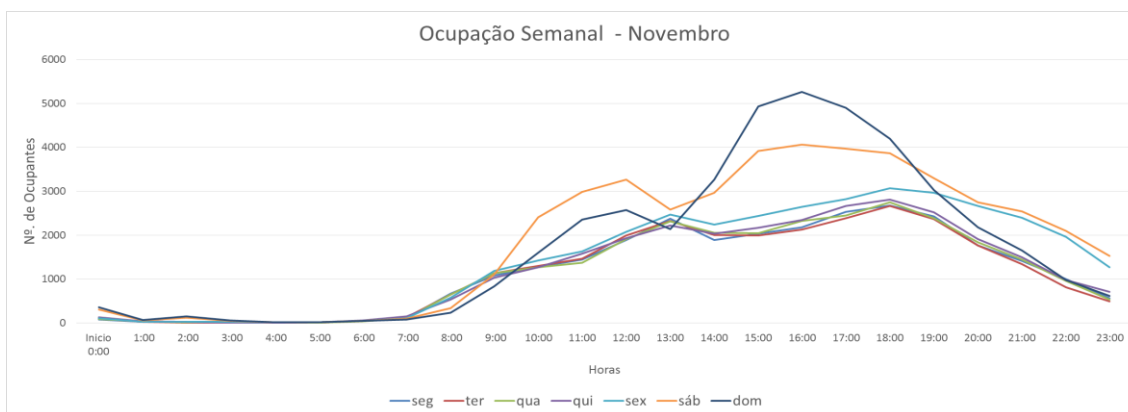


Figura A. 11 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Novembro

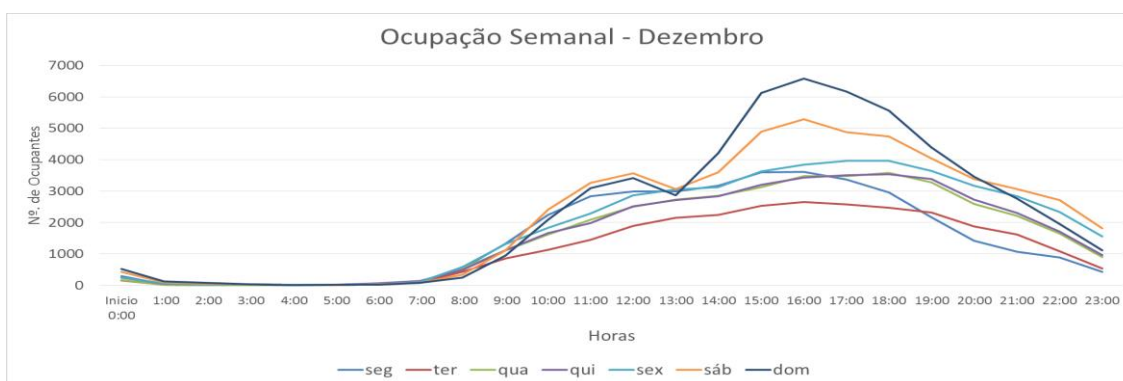








Figura A. 12 - Densidade de ocupação semanal para o mês de Dezembro

A.2. Soluções Construtivas – Palácio do Gelo Shopping

Tabela A. 1 - Soluções Construtivas utilizadas no modelo de simulação Dinâmica do Palácio do Gelo Shopping

Parede exterior	material	espessura [m]	K [w/mk]	cp [j/kgk]	ρ [g/m3]	R[m2k/w]
	Acabamento	----	----	----	----	----
	Bloco de Betão	0,15	0,51	1000	1400	0,29
	Caixa-de-ar	0,04	0,19	1000	1000	0,21
	XPS	0,01	0,34	1400	35	0,04
	Bloco de Betão	0,15	0,51	1000	1400	0,29
	Tipos de Acabamento	espessura (m)	K (W/mk)	cp (j/KgK)	ρ (g/m3)	R (m2K/W)
	Reboco	0,03	0,50	1000	1300	0,06
	Granito	0,03	2,80	1000	2600	0,01
	Reynobond	0,00	0,85	837	2000	0,00
Terraço	material	espessura (m)	K (W/mk)	cp (j/KgK)	ρ (Kg/m3)	R (m2K/W)
	Granito	0,03	2,80	1000	2600	0,01
	Betume	0,07	0,23	1000	1100	0,30
	EPS	0,20	0,05	1400	10	4,35
	Laje aligeirada	0,38	0,76	840	780	0,50
Cobertura	material	espessura (m)	K (W/mk)	cp (j/KgK)	ρ (Kg/m3)	R (m2K/W)
	Betume	0,10	0,23	1000	1100	0,43
	Lã de Rocha	0,12	0,04	840	40	3,16
	Laje aligeirada	0,32	0,76	840	780	0,42
	Caixa de ar	1,00	0,89	1000	1	1,12
	Teto Falso (Gesso Cartonado)	0,01	0,25	896	2800	0,04
Compartimentos Interiores	material	espessura (m)	K (W/mk)	cp (j/KgK)	ρ (Kg/m3)	R (m2K/W)
	Bloco de Betão	0,15	0,51	1000	1400	0,29
Lajes Interiores com tetos falsos	material	espessura (m)	K (W/mk)	cp (j/KgK)	ρ (Kg/m3)	R (m2K/W)
	azuleijo	0,01	1,40	840	2500	0,00
	Laje aligeirada	0,25	0,86	840	930	0,29
	Caixa de ar	1,00	0,89	1000	1	1,12
	Teto falso(Gesso cartonado)	0,01	0,25	896	2800	0,04
Lajes zonas técnicas	material	espessura (m)	K (W/mk)	cp (j/KgK)	ρ (Kg/m3)	R (m2K/W)
	Laje aligeirada	0,25	0,86	840	930	0,29

A.3. CÓDIGO IMPLEMENTADO NO ARDUINO

```
//Galp 20-20-20 SCMQAI
//CO2sensor*****
*****/

/*****Hardware
Related
Macros*****/
#define MG_PIN (0)
#define BOOL_PIN (8)
#define DC_GAIN (8.5)

/*****Software
Related
Macros*****/
#define READ_SAMPLE_INTERVAL (50)
#define READ_SAMPLE_TIMES (10)

/*****Application
Related
Macros*****/
#define ZERO_POINT_VOLTAGE (0.465)
#define REACTION_VOLTAGE (0.041)

/*****Globals*****
*****/
float CO2Curve[3] = {
    2.602,ZERO_POINT_VOLTAGE,(REACTION_VOLTAGE/(2.602-3))};
//*****
*****/

#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(12,11,2,3,4,5);
int Relay = 10;
unsigned long time;
unsigned long i;
void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    pinMode(BOOL_PIN, INPUT);
    digitalWrite(BOOL_PIN, HIGH);
```

```
lcd.begin(16, 2);
lcd.print("CO2:");
pinMode(10, OUTPUT);
digitalWrite(10, HIGH);
pinMode(Relay, OUTPUT);
Serial.print( "Galp 20-20-20 SCMQAI:" );
Serial.print('\n');
Serial.println("");
}
void loop()
{
  time = millis();
  int percentage;
  float volts;
  volts = MGRead(MG_PIN);
  percentage = MGGetPercentage(volts,CO2Curve);
  if (time >= 10000*i)
  {
    Serial.print(volts);
    Serial.print( " V;" );
    if (percentage == -1) {
      Serial.print( "<400" );
      Serial.print(" PPM;");
      Serial.print('\n');
    }
    else {
      Serial.print(percentage);
      Serial.print("\t");
      Serial.print(" PPM;");
      Serial.print('\n');
    }
  }
  i=i++;
}
lcd.setCursor(3, 1);
lcd.print("  PPM");
```

```
if (percentage == -1) {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("<400");
}
else {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(percentage);
}
if (percentage > 900) {
    digitalWrite(Relay, HIGH);
}
if (percentage < 750) {
    digitalWrite(Relay, LOW);
}
}

float MGRead(int mg_pin)
{
    int i;
    float v=0;
    for (i=0; i<READ_SAMPLE_TIMES; i++) {
        v += analogRead(mg_pin);
        delay(READ_SAMPLE_INTERVAL);
    }
    v = (v/READ_SAMPLE_TIMES) * 5/1024 ;
    return v;
}

int MGGetPercentage(float volts, float *pcurve)
{
    if ((volts/DC_GAIN) >= ZERO_POINT_VOLTAGE) {
        return -1;
    }
    else {
        return pow(10, ((volts/DC_GAIN)-pcurve[1])/pcurve[2]+pcurve[0]);
    }
}
```